CENTRE
DE RECHERCHE
SUR LES TRANSPORTS
(CRT)
CENTRE
FOR RESEARCH
ON TRANSPORTATION

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE DES HAUTES ÉTUDES COMMERCIALES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE

C.P. 6128, SUCCURSALE A
MONTRÉAL (QUÉBEC)
CANADA
H3C 3J7

TÉLÉPHONE : (514) 343-7575
TÉLEX : 05-24146 BIBPOLYTEC
TÉLÉCOPIEUR (FAX) : (514) 343-7121

CRT-637

SIMTRUCK : UN SIMULATEUR D'ENTREPRISES DE TRANSPORT ROUTIER DE MARCHANDISES

Rapport d'étape

par

Christian Lardinois et Johanne Côté

avec la collaboration de

Teodor Crainic, Michel Gendreau
Johanne Dion, Louis Delorme

Cette recherche a été financée par le Fonds F.C.A.R. (Programme - Action concertée sur le transport des marchandises, parrainé par le ministère des Transports du Québec) et par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada.

Centre de recherche sur les transports - Publication # 637

Juin 1989

89-05953/

Dépôt légal - 3e trimestre 1989

TABLE DES MATIÈRES

Page

1. INTRODUCTION. 1

2. PROBLÉMATIQUE 2

3. OBJECTIFS DU PROJET 4

4. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE ET PRÉCISIONS SUR LES OBJECTIFS 5

5. DESCRIPTION GÉNÉRALE DU SIMULATEUR. 8
   - 5.1 - Domaines et situations de jeu 8
   - 5.2 - Principe général de fonctionnement du simulateur. 10
   - 5.3 - Le système d'aides à la décision et à l'évaluation. 13
   - 5.4 - Les niveaux de complexité liés à l'accessibilité aux aides à la décision 15
   - 5.5 - Autres niveaux de complexité. 16
   - 5.6 - Résumé : structure de gestion et structure informatique de SIMTRUCK 18

6. LE CAS DE LA PLANIFICATION STRATÉGIQUE ET/OU TACTIQUE 22
   - 6.1 - Données de base, variables de décision et variables de simulation 22
     - 6.1.1 - Une seule compagnie. Planification tactique seulement 22
     - 6.1.2 - Plusieurs compagnies/participants en concurrence. Planification stratégique et tactique. 25
   - 6.2 - Tests de validité et de cohérence des variables de décision. 28
     - 6.2.1 - Une seule compagnie. Planification tactique seulement 28
     - 6.2.2 - Plusieurs compagnies/participants en concurrence. Planification stratégique et tactique. 29
   - 6.3 - Modules de simulation 30
     - 6.3.1 - Une seule compagnie. Planification tactique seulement 32
     - 6.3.2 - Plusieurs compagnies/participants en concurrence. Planification stratégique et tactique. 32
   - 6.4 - Le module de réseau, le module d'aide à la décision et le module d'évaluation 35
     - 6.4.1 - Présentation de NETPLAN 35
     - 6.4.2 - Définition des états du système de transport. 38
     - 6.4.3 - Utilisation de NETPLAN dans SIMTRUCK. 40

Page

6.5 - Dépassement des capacités de service et temps de calcul . . . 43
6.5.1 - Présentation des problèmes. 43
6.5.2 - Services improvisés quand le routing des marchandises est endogène. 46
6.5.3 - Services improvisés quand le routing est exogène. . . 51
6.5.4 - Résumé et retards correspondants aux services improvisés. 51
6.6 - Le module de répartition de la demande et la notion de fiabilité. 52
6.6.1 - Le modèle de répartition. 53
6.6.2 - Le modèle de fiabilité. 54
6.6.3 - Prise en compte des limites sur les volumes transportés 61
6.7 - Banque de données et interfaces avec l'usager et avec NETPLAN 62
6.7.1 - Interface Usager-Logiciel 62
6.7.2 - Structure de la Banque de Données 66
6.7.3 - Interface Banque de Données - NETPLAN 74
6.8 - Transfert de NETPLAN sur micro-ordinateur 75

7. LE CAS DU DISPATCHING 77
7.1 - Description du problème 79
7.2 - Principe méthodologique : Simulation dynamique par événements discrets 83
7.2.1 - Les notions d'état et d'événement 83
7.2.2 - L'horloge et la liste des événements. 85
7.2.3 - Le mécanisme de dilatation du temps 87
7.3 - Données et variables de base, variables de décision et variables de simulation. 90
7.4 - Les modules de simulation et le module d'aide à la décision et à l'évaluation. 95
7.4.1 - Les quatre modules de simulation. 96
7.4.2 - Le module de répartition assistée par ordinateur. . . 97

8. CONCLUSION. 101

RÉFÉRENCES 103

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1 : Structure de gestion et structure informatique de SIMTRUCK. 21

Figure 2 : Modules de simulation de SIMTRUCK pour les combinaisons D-S-N relatives à la planification stratégique et/ou tactique 31

Figure 3 : Modélisation des services fictifs. 48

Figure 4 : Distribution statistique des temps de service. 55

Figure 5 : Le taux de fiabilité théorique 55

Figure 6 : Mesure de fiabilité relative 59

Figure 7 : Interfaces Usager/Banque de Données/NETPLAN. 64

Figure 8 : Description des enregistrements. 68

Figure 9 : Les marchés, leurs itinéraires et leurs éléments 69

Figure 10 : Les services et les itinéraires les empruntant 70

Figure 11 : Listes des services de même origine et de même destination. 71

Figure 12 : Arrivées des requêtes. 81

Figure 13 : Le concept d'horloge 87

Figure 14 : Dilatation du temps. 89

Figure 15 : Modules de simulation et d'aide à la décision et à l'évaluation pour la version dispatching de SIMTRUCK. 97

1. INTRODUCTION

Ce rapport fait état des travaux de recherche-développement accomplis dans le cadre d'une subvention octroyée par le Fonds F.C.A.R. pour un projet intitulé "Un système de jeux informatisés pour la formation et l'analyse expérimentale dans le domaine de la planification et de la gestion du transport routier de marchandises".

Les chapitres 2 et 3 constituent un bref rappel de la problématique et des objectifs du projet, et le chapitre 4 présente dans ses grandes lignes l'approche méthodologique choisie. Le chapitre 5 décrit ensuite les résultats de nos travaux sur la conception et le fonctionnement général du système, sur les différents domaines d'étude qu'il considère dans le cadre de différentes situations de jeu avec différents niveaux de complexité, et sur sa structure informatique. Le chapitre 6 décrit en détail les problèmes de modélisation mathématique et de développement informatique qui ont été traités lorsque les domaines d'étude et situations de jeu considérés se situent au niveau de la planification stratégique et tactique dans des entreprises de camionnage. Le chapitre 7, à un niveau plus opérationnel, concerne le domaine plus particulier du dispatching. Le chapitre 8 conclut ce rapport.

L'équipe de chercheurs était constituée de Christian Lardinois (responsable), Teodor Crainic et Michel Gendreau. Louis Delorme a également collaboré aux travaux. Les développements informatiques ont été assurés par Johanne Côté, d'abord à titre d'étudiante au premier cycle, ensuite comme professionnelle (analyste-programmeur); Johanne Dion, étudiante à la maîtrise, a également contribué à ces développements.

2. PROBLÉMATIQUE

Comme dans d'autres secteurs industriels, la tâche des planificateurs, gestionnaires et autres responsables du transport routier de marchandises se caractérise par (i) la complexité et la diversité des décisions à prendre à différents niveaux dans l'entreprise, avec différents horizons de planification/gestion, (ii) les fortes interactions entre ces niveaux, ces décisions et leurs effets, et (iii) la nécessité de tenir compte d'un environnement technologique, économique et réglementaire à la fois complexe et changeant. Les responsables gouvernementaux également sont confrontés à de semblables difficultés d'analyse lorsqu'ils ont à élaborer des politiques de transport, par exemple en matière de (dé)réglementation.

En outre, le domaine du transport routier de marchandises en est un qui se prête difficilement à l'expérimentation. En fait, toute modification des règles de jeu dans l'industrie et tout changement dans les politiques, stratégies et opérations des transporteurs, ont des impacts tels qu'il s'avère très difficile, voire impossible de les évaluer sans les implanter réellement. Il en est de même pour l'évaluation des nouvelles méthodes ou techniques de planification/gestion dans ce domaine.

Deux constations, auxquelles correspondent deux questions fondamentales, étaient ainsi à l'origine de notre projet: (1) Comment former des individus au travail complexe et multidisciplinaire de planification/gestion dans des entreprises de transport routier de marchandises ? (2) Comment évaluer des scénarios, politiques, stratégies ou techniques en ce domaine sans les expérimenter en pratique, "in situ" ?

Aux deux constatations ci-dessus, les réflexions que nous avons menées dans le cadre de ce projet nous ont amené à en ajouter une troisième, à savoir qu'au niveau des entreprises de camionnage on constate une certaine "résistance" au changement technologique qui se traduit notamment par la difficulté à y faire pénétrer de nouvelles méthodes et techniques de

travail. Le problème de l'expérimentation en question ci-dessus, le manque de dialogue et de collaboration entre l'industrie et les chercheurs, l'obligation pour chaque entreprise de résoudre ses nombreux problèmes à court terme, le manque de ressources, etc. sont autant d'explications à cette constatation, mais il reste que ce phénomène handicappe la productivité et la compétitivité de l'industrie québécoise du transport routier de marchandises. D'où une troisième question cruciale : (3) Comment amener l'industrie du camionnage à prendre connaissance et à utiliser de nouvelles méthodes d'analyse et de prise de décision ?

3. OBJECTIFS DU PROJET

Dans le but de fournir une réponse aux deux questions initiales énoncées plus haut, notre objectif a été d'entreprendre la conception et le développement d'un **système informatisé** destiné à être utilisé : (1) **comme instrument d'aide à la formation de planificateurs, gestionnaires et autres professionnels dans le domaine du transport routier de marchandises, (2) comme outil d'expérimentation pour la recherche, l'analyse et la formation de chercheurs dans ce domaine.**

La troisième question énoncée précédemment nous a par ailleurs conduit à viser une autre utilisation pour le système prévu, à savoir qu'il puisse aussi être utilisé : (3) **comme support au transfert technologique, c'est-à-dire comme un moyen pour amener l'industrie à découvrir et à se familiariser avec de nouvelles méthodes de planification/ gestion.**

Précisons que dans ce projet, on s'est limité, tel que prévu, au secteur du camionnage en lots brisés (LTL).

4. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE ET PRÉCISIONS SUR LES OBJECTIFS

La démarche méthodologique utilisée dans notre projet est basée sur l'utilisation des techniques de la modélisation mathématique, de la recherche opérationnelle et de la micro-informatique dans le cadre de l'approche que la littérature anglo-saxonne désigne par **"gaming-simulation"**. Cette approche s'est surtout développée à la fin des années '40 quand l'émergence de la recherche opérationnelle et de l'informatique a suscité le développement de **jeux de simulation** conçus comme des modèles mathématiques informatisés et appliqués à différents contextes, notamment celui de la gestion d'affaires (voir le numéro spécial de la revue "Simulation and Games" : référence [9]), mais aussi dans bien d'autres domaines aussi diversifiés que les sciences politiques, l'utilisation du sol et le développement urbain, la psychologie, les communications, la science militaire, etc. Dans le domaine du transport, quelques jeux de simulation ont également été développés, d'une part en transport urbain (voir par exemple [11]) et d'autre part en transport interurbain de passagers, surtout aérien (voir par exemple [3]). Quant au transport de marchandises, mis à part certains jeux portant sur la dimension logistique ou la localisation de dépôts, nous ne connaissons que le CONRAIL Deregulation Game [2] qui porte sur l'impact des tarifs en transport ferroviaire, et JUTRE [6] qui modélise de façon très simplifiée le système de transport de personnes et de marchandises dans un pays en développement. Pour une revue des concepts théoriques et des techniques de l'approche "gaming-simulation", voir, entre autres, la référence [4]. Pour un résumé général et d'autres références dans ce domaine, voir la section 3.2 de [5].

Compte tenu des objectifs définis précédemment en termes de formation et d'expérimentation, l'approche "gaming-simulation" appliquée à notre projet nous a conduit à concevoir l'outil envisagé sous la forme d'un **système informatisé de jeux de simulation, d'analyse et de prise de**

décisions dans un environnement artificiel reproduisant la réalité et la complexité de diverses situations que peuvent rencontrer en pratique de véritables planificateurs, gestionnaires et autres professionnels dans des entreprises de camionnage en lots brisés.

De plus, compte tenu de l'objectif également défini plus haut de transfert technologique, **ce simulateur d'entreprises de transport routier de marchandises - que nous appelons SIMTRUCK** - a été conçu de façon à intégrer un système d'aides à la décision et à l'évaluation (incluant des procédures d'optimisation) pour permettre à un utilisateur non familier avec ce genre d'outils d'en prendre connaissance et de les expérimenter dans un environnement semblable à la réalité. Cette caractéristique du simulateur constitue à notre avis un moyen très original pour favoriser le transfert des concepts et outils en question vers l'industrie.

Soulignons aussi que pour faciliter son utilisation dans différents contextes (universités, entreprises de camionnage, cégeps, organismes de formation, agences gouvernementales, ...), le développement de SIMTRUCK a été entrepris sur un micro-ordinateur (IBM PC AT) et avec l'objectif d'y intégrer une interface usager-logiciel conviviale (user-friendly) et autant que possible interactive et graphique.

Enfin, il convient de souligner que, dans la demande de subvention, nous nous étions fixé aussi comme objectif le développement d'un système qui soit suffisamment souple pour permettre le traitement de différentes situations, avec différents niveaux de complexité.

En résumé, dans le cadre de ce projet de recherche-développement, l'objectif a été de concevoir un simulateur qui :

a) **en tant qu'outil de formation**, permette aux participants-joueurs de développer leurs connaissances, leur compréhension et leurs aptitudes décisionnelles dans des situations diversifiées en tenant compte :

a.1) de la multiplicité des décisions à prendre à différents niveaux dans l'entreprise, avec différents horizons de planification/ gestion;

a.2) des interactions entre ces niveaux, ces décisions et leurs effets;

a.3) des pressions et contraintes exercées par le contexte économique, commercial, technologique et réglementaire, ce qui inclut notamment les phénomènes de concurrence;

b) **en tant qu'outil d'expérimentation**, puisse être utilisé pour l'analyse, l'évaluation ou la comparaison de divers "objets d'étude", comme par exemple des scénarios relatifs au contexte économique, des politiques d'offre au niveau des compagnies, des stratégies d'opération, etc., voire même de nouvelles méthodes ou techniques de planification/ gestion (e.g. un modèle mathématique, un algorithme, ...);

c) **en tant que support au transfert technologique**, intègre des outils d'aide à la décision relatifs à différents niveaux dans l'entreprise et à différents problèmes d'analyse et de prise de décision.

Bref, le simulateur a été conçu sous la forme d'un **laboratoire**, cela de façon générale et souple pour couvrir différentes dimensions et différents domaines de la planification/ gestion en transport routier de marchandises. Cela ne veut pas dire évidemment qu'il traite simultanément tous ces domaines et les problèmes correspondants. Par contre, cela signifie que SIMTRUCK a été conçu pour être développé et utilisé de façon modulaire, les utilisateurs sélectionnant le domaine d'étude (i.e. les types de problèmes) et le niveau de complexité qu'ils souhaitent traiter dans une simulation spécifique.

5. DESCRIPTION GÉNÉRALE DU SIMULATEUR

5.1 DOMAINES ET SITUATIONS DE JEU

Tel que prévu, nous avons considéré jusqu'à présent trois **Domaines d'étude**, ou plus exactement trois ensembles de problèmes d'analyse et de prise de décisions. D'autres Domaines pourront être intégrés au simulateur dans la suite de nos travaux.

Le premier Domaine (D1) est celui de **la planification tactique**, à moyen terme, du réseau de transport assuré par une compagnie de camionnage. Il implique essentiellement le design du réseau des services offerts sur un ensemble donné de marchés (paires de villes) et le routing des marchandises dans ce réseau; il implique également des choix au niveau des terminus (nombre, localisation et taille). Dans le cadre de ce domaine d'étude, les volumes de marchandises à transporter sur les différents marchés (demandes origine-destination) ainsi que les normes de service sur ces marchés (délais de livraison garantis aux clients) sont donnés, et on suppose qu'il n'y a pas de restriction sur le nombre de véhicules disponibles.

Le second Domaine (D2), que nous appelons celui de **la planification stratégique et tactique**, correspond à un élargissement du Domaine D1, c'est-à-dire à une augmentation du nombre de degrés de liberté et de problèmes à résoudre. En particulier, on y ajoute les problèmes de nature économique et commerciale liés à la concurrence exercée par d'autres compagnies de camionnage : choix des marchés, des normes de service et des tarifs. On y inclut aussi les autres grands problèmes de planification représentatifs des niveaux de décision "supérieurs" dans une entreprise de transport : planification de la flotte de véhicules (achats/ locations), politiques de marketing, gestion budgétaire, emprunts/remboursements bancaires, etc. Il s'agit donc avec le Domaine D2 d'être aussi complet que possible du point de vue de l'organisation "générale" (stratégique et tactique) des politiques d'offre et des principales activités de compagnies

de camionnage dans un environnement compétitif véritablement représentatif des diverses dimensions de la réalité. Les pressions et contraintes économiques et réglementaires sont notamment prises en compte.

Le troisième Domaine (D3), très différent des deux autres, se situe au niveau plus opérationnel de la gestion quotidienne dans une entreprise de camionnage. C'est celui du **dispatching local**[1] **(messagerie)** qui a trait à l'organisation des opérations de cueillette et livraison des marchandises en milieu urbain et suburbain à partir d'un terminus.

Nous définissons par ailleurs trois **Situations de jeu.** La Situation la plus simple (S1) correspond au cas d'une seule compagnie, avec un seul participant-joueur en situation d'**apprentissage.** La deuxième Situation (S2) met en jeu plusieurs participants en charge de la même compagnie et qui jouent **en parallèle** de façon à comparer leurs performances. La Situation la plus complexe (S3) correspond au cas de plusieurs participants en charge de différentes compagnies **en concurrence** les unes avec les autres.

La Situation S1 a été appliquée aux Domaines D1 et D3. La Situation S2 a été appliquée au Domaine D1. La Situation S3 a été appliquée au Domaine D2. Cela signifie que jusqu'à présent nos travaux ont porté (tel que prévu) sur les combinaisons suivantes :

D1-S1 Le simulateur ne fait intervenir qu'une seule compagnie, avec un seul participant en charge du travail de planification tactique dans la compagnie considérée.

D1-S2 C'est la même chose qu'avec D1-S1, mais avec plusieurs participants en charge de la même compagnie et qui jouent en parallèle de façon à comparer leurs performances en termes de planification tactique.

---

[1]. Le dispatching "central", au niveau du réseau, sera traité dans la suite de nos travaux. Il n'était pas prévu de le traiter dans le cadre de la subvention en question ici.

D2-S3 Le simulateur met en présence plusieurs participants en charge de la planification stratégique et tactique dans différentes compagnies en concurrence les unes avec les autres.

D3-S1 Le simulateur ne fait intervenir qu'une seule compagnie, avec un seul participant en charge du dispatching dans un terminus de la compagnie considérée.

5.2 PRINCIPE GÉNÉRAL DE FONCTIONNEMENT DU SIMULATEUR

Compte tenu de la définition ci-dessus des combinaions D-S, SIMTRUCK a été conçu pour mettre en présence une ou plusieurs compagnies, et donc un ou plusieurs participants, chacun jouant le rôle d'un planificateur, gestionnaire ou autre professionnel confronté à une gamme relativement limitée, ou au contraire très diversifiée, de problèmes d'analyse et de prise de décisions dans "sa" compagnie, cela dans un environnement plus ou moins complexe.

Le cas le plus simple (relativement) correspond à la combinaion D3-S1 où il y a une seule compagnie présente avec un seul participant qui, au niveau opérationnel, est confronté au seul problème du dispatching dans un terminus. Les combinaisons D1-S1 et D1-S2, au niveau de la planification tactique, font intervenir une gamme plus diversifiée de problèmes interreliés les uns aux autres, mais également avec une seule compagnie en jeu. Le cas le plus complexe correspond à la combinaison D2-S3 qui, au niveau stratégique et tactique, implique un éventail beaucoup plus large de problèmes interdépendants en situation de concurrence.

Dans le cas des trois combinaisons D-S impliquant des décisions au niveau stratégique et/ou tactique, chaque simulation est constituée d'une succession de "périodes de simulation" entre lesquelles le ou les participants sont invités à prendre leurs décisions, par exemple tous les ans ou tous les six mois. Chaque "période de simulation" correspond donc à une

période fixe d'activités de la ou des compagnies présentes, et le temps s'arrête à la fin de chaque période de façon à ce que le ou les participants préparent leurs décisions pour l'année ou les six mois qui suivent. Bien sûr, chaque période ne dure en pratique que quelques secondes ou dizaines de secondes.

Dans le cas du dispatching, chaque simulation est également constituée d'une succession de "périodes de simulation", mais cette suite de périodes est (en principe[1]) ininterrompue et la durée de chaque période est en fait inconnue à l'avance : c'est la durée qui sépare deux événements consécutifs dans le temps, par exemple l'arrivée d'une nouvelle requête à satisfaire (cueillette/livraison) et la décision d'envoyer un véhicule sur le lieu de cette requête, sans arrêt du temps. On travaille en temps réel simulé, les décisions étant prises au fur et à mesure que surviennent différents événements, certains étant totalement aléatoires.

Quelle que soit la combinaison D-S considérée, les décisions sont prises via un programme interactif d'entrée-sortie qui permet à l'usager d'une part de consulter à l'écran du micro-ordinateur la banque de données sur l'état du système et sur sa compagnie, et d'autre part d'entrer effectivement ses décisions. Ce programme permet également la production de rapports imprimés décrivant "ce qui s'est passé" durant la ou les périodes précédentes. A la fin de chaque période, un autre personnage peut également intervenir : c'est le maître de jeu qui orchestre le déroulement de la simulation et qui, à ce titre, peut prendre des décisions relativement à l'évolution du contexte considéré (par exemple, selon la combinaison D-S choisie : augmenter les niveaux de demande sur les marchés considérés, augmenter la fréquence des requêtes pour les cueillettes et livraisons de marchandises, etc.).

---

[1]. On verra au chapitre 7 que le temps peut être ralenti, voire même figé également, dans le cas du dispatching.

Quand le ou les participants et le maître de jeu ont entré leurs décisions, le programme de simulation proprement dit est alors mis en oeuvre pour simuler leurs effets sur les demandes de transport concernées et sur la ou les compagnies en jeu, leurs opérations et leurs performances, ceci incluant la simulation des phénomènes de concurrence si plusieurs plusieurs compagnies sont présentes. En d'autres mots, la fin d'une prise de décisions correspond toujours au début d'une nouvelle période de simulation, cela quelle que soit la combinaison D-S. Toutefois, tel qu'indiqué ci-dessus, dans le cas de la combinaison D3-S1 (dispatching), plusieurs périodes de simulation peuvent se succéder même si l'usager-dispatcheur ne prend aucune décision; les débuts de ces périodes successives correspondent alors simplement à l'arrrivée de différents événements qui n'ont pas entraîné de décisions de la part de l'usager- dispatcheur (exemple : arrivée d'un véhicule sur le lieu d'une requête, départ de ce lieu, retour au terminus, etc.).

Après chaque exécution du programme de simulation, chaque participant se retrouve dans une nouvelle situation qui correspond à l'état du système une période plus tard (1 an, 6 mois, ..., 1 heure, 10 minutes, ...), et le processus se répète. Une simulation globale couvre ainsi une succession de périodes d'activités simulées en fonction des décisions prises par le ou les participants, par le maître de jeu, ainsi qu'en fonction des interactions entre toutes ces décisions. Chaque participant subit ainsi un apprentissage progressif où il peut tester différentes stragégies, analyser leurs conséquences (et celles de ses compétiteurs éventuels), développer ses connaissances des mécanismes d'offre et de demande en jeu, etc., y compris en fonction de l'évolution du contexte envisagé. Dans le cas des simulations au niveau de la planification stratégique et/ou tactique (domaines D1 et D2), une simulation globale va couvrir plusieurs périodes de 6 ou 12 mois (on peut penser à 4 à 8 périodes), alors que dans le cas d'une simulation relative au dispatching, elle couvrira un nombre beaucoup plus

important de périodes (de l'ordre de plusieurs dizaines ou plusieurs centaines) correspondant à plusieurs heures ou à une journée de travail complète d'un véritable dispatcheur.

La description ci-dessus correspond essentiellement à la fonction **formation** de SIMTRUCK. Dans le cas d'un exercice d'**expérimentation** pour une analyse ou une recherche particulière (e.g. analyse d'une stratégie donnée, étude d'un mode de réglementation, expérimentation d'un modèle mathématique, ...), SIMTRUCK constituera l'environnement artificiel et contrôlé permettant de tester l'objet d'étude envisagé. Quant à la troisième fonction du simulateur, i.e. celle qui a trait au **transfert technologique**, nous précisons dans la section suivante comment elle peut être assurée.

Remarque : La description ci-dessus suppose, comme on l'a dit, la présence d'un maître de jeu qui orchestre le déroulement de chaque simulation et l'évolution du contexte où sont plongées la ou les compagnies considérées. En fait, ce rôle de maître de jeu peut fort bien être assuré par l'un ou l'autre des participants. En particulier, dans le cas d'une situation de jeu à un seul participant, c'est celui-ci qui le plus souvent va orchestrer lui-même son propre apprentissage, notamment en se soumettant progressivement à des niveaux de complexité de plus en plus élevés (voir les sections 5.4 et 5.5).

5.3 LE SYSTÈME D'AIDES À LA DÉCISION ET À L'ÉVALUATION

Dans le cadre du processus décrit plus haut, et quelle que soit la combinaison D-S considérée, le maître de jeu pourra permettre à chaque participant d'avoir recours à un **système d'aides à la décision et d'aides à l'évaluation**, soit pour l'assister dans ses prises de décisions (certaines étant alors suggérées au participant ou totalement prises à sa place), soit pour lui permettre d'évaluer ses décisions et leurs performances. Les procédures d'optimisation incluses dans ce système d'aides à la

décision et à l'évaluation correspondent aux nouvelles méthodes de planification/gestion avec lesquelles un utilisateur de SIMTRUCK pourra se familiariser conformément à l'objectif de transfert technologique dont nous avons parlé.

Dans le cas des simulations impliquant des décisions au niveau de la planification stratégique et/ou tactique (combinaisons D1-S1, D1-S2 et D2-S3), c'est le logiciel NETPLAN développé par T. Crainic et d'autres collègues (réf. [1]) qui a été adapté et intégré au simulateur pour remplir le rôle d'aide à la décision. Ce rôle est précisé dans la section 6.4. On y indique comment NETPLAN peut déterminer le routing des marchandises à la place d'un joueur.

Dans le cas des simulations relatives au dispatching (combinaison D3-S1), c'est un module de répartition assistée par ordinateur (module RAO) basé sur une méthode développée par J.-M. Rousseau et d'autres collègues également (réf. [7]) qui remplira le rôle d'aide à la décision. Un participant pourra avoir recours à ce module RAO pour solliciter différentes suggestions quant à l'affectation des véhicules aux demandes (requêtes pour les cueillettes et livraisons). Ce rôle est précisé dans la section 7.4.

Tel qu'indiqué ci-dessus, SIMTRUCK est également conçu de façon à intégrer des aides à l'évaluation, c'est-à-dire des outils auxquels le ou les participants peuvent avoir recours pour évaluer "a posteriori" leurs décisions. En fait, ce seront notamment les modules NETPLAN et RAO qui seront également utilisés à ce niveau pour déterminer des "décisions optimales ou sous-optimales" dont les performances serviront de référence pour l'évaluation des décisions du ou des participants. Voir également les sections 6.4 et 7.4. Ce double rôle des modules NETPLAN et RAO (prises ou suggestions de décisions d'une part, et évaluation de décisions d'autre part) explique pourquoi nous parlons d'un seul et même système d'aides à la décision et à l'évaluation, mais il faut bien comprendre que ces deux rôles, ces deux fonctions, sont totalement distinctes.

5.4 LES NIVEAUX DE COMPLEXITÉ LIÉS À L'ACCESSIBILITÉ AUX AIDES À LA DÉCISION

La distinction établie plus haut entre les deux fonctions des modules NETPLAN et RAO se manifeste en fait au niveau de l'accessibilité des participants à ces fonctions. Cette accessibilité est toujours permise pour fins d'évaluation "a posteriori" des décisions. Par contre, l'accessibilité "a priori" à ces modules en tant qu'aides pour la prise de nouvelles décisions n'est pas systématique : c'est le maître de jeu qui en décide. C'est la raison pour laquelle dans ce qui suit, et à l'occasion dans d'autres sections du rapport, nous parlons plus précisément du **système d'aides à la décision** quand il s'agit de l'utilisation "a priori" des modules NETPLAN et RAO, i.e. pour la prise de décisions proprement dite, par opposition à leur utilisation a posteriori pour fins d'évaluation. Quand la distinction ne sera pas requise, nous parlerons comme plus haut du **système d'aides à la décision et à l'évaluation**, lequel pourra d'ailleurs inclure, en plus des modules NETPLAN et RAO, d'autres outils, d'autres aides pour fins d'évaluation.

La conséquence de ce qui précède se traduit en termes de **Niveaux de complexité.** Etant donné en effet que c'est le maître de jeu qui décide de l'accessibilité du ou des participants en jeu au système d'aides à la décision, il est clair que ce ou ces participants seront confrontés à deux niveaux de complexité très différents (N1 ou N2) selon qu'ils ont ou non accès à ce système. Les quatre combinaisons D-S définies précédemment déterminent donc en fait huit cas possibles :

D1-S1-N1; D1-S2-N1; D2-S3-N1. Ces trois combinaisons, qui toutes impliquent de la part du ou des participants des décisions en termes de planification tactique, donnent accès au système d'aides à la décision (au module NETPLAN plus précisément). Le ou les joueurs doivent prendre des décisions sur le design du réseau de services et sur le nombre, la localisation et la

taille des terminus (ainsi que sur d'autres questions quand il s'agit de la combinaison D2-S3-N1), mais ils n'ont pas à décider du routing des marchandises. Celui est déterminé – en fait optimisé – par NETPLAN.

D1-S1-N2; D1-S2-N2; D2-S3-N2. Les simulations correspondant à ces trois combinaisons sont analogues aux trois précédentes, mais le ou les participants n'ont plus accès au module NETPLAN pour la détermination du routing des marchandises. Ils doivent eux-mêmes organiser ce routing.

D3-S1-N1. Cette combinaison, relative au dispatching, donne accès au système d'aides à la décision (au module RAO plus précisément). Le participant peut solliciter différentes suggestions concernant l'affectation des véhicules aux requêtes.

D3-S1-N2. La simulation relative à cette combinaison est analogue à la précédente, mais le participant n'a plus accès au module RAO.

5.5 AUTRES NIVEAUX DE COMPLEXITÉ

La "taille" des problèmes et le contexte auxquels le ou les participants sont confrontés constituent une deuxième façon, pour le maître de jeu, de définir différents niveaux de complexité.

Ainsi, dans le cas des combinaisons D-S-N impliquant le Domaine D1 (planification tactique) avec un seul participant en apprentissage (Situation S1) ou plusieurs participants en parallèle (Situation S2), différents choix sont possibles concernant, par exemple, le nombre des marchés, les niveaux de demande (volumes de marchandises) et les normes de service (délais de livraison à respecter) sur ces marchés, les terminus existants au départ de la simulation (nombre, localisation et taille), etc. A ces différents choix correspondent différents niveaux de complexité du point de vue de la taille et des configurations possibles du réseau des services de camionnage. De même, dans le cas des combinaisons impliquant le Domaine D2 (planification stratégique et tactique) avec plusieurs compagnies/

participants en concurrence (Situation S3), plusieurs autres niveaux de complexité seront possibles en fonction du nombre de compagnies en jeu et des contraintes exercées par le contexte économique et institutionnel (réglementation sur les entrées/sorties des marchés et sur les tarifs, facilité plus ou moins grande d'emprunts bancaires, prix de l'énergie, etc.).

Dans le cas du Domaine D3 (dispatching), le maître de jeu aura également la possibilité de définir différents niveaux de complexité qui seront fonction, entre autres, de la taille de la flotte de véhicules disponibles et de différents paramètres liés aux cueillettes et livraisons à satisfaire (nombre, volume, distribution dans le temps, répartition spatiale, etc.).

Il y a une troisième façon, pour le maître de jeu, de rendre la tâche d'un participant plus ou moins complexe, au début d'une simulation. C'est au niveau de l'histoire antérieure de la compagnie confiée à ce participant. Les cas les plus simples (quelle que soit la combinaison D-S-N) sont ceux où le participant se voit confié une compagnie qui a effectivement une histoire, c'est-à-dire qui a déjà été en opération dans le contexte considéré. Dans ces cas, le participant dispose d'informations plus ou moins détaillées sur les activités passées de sa compagnie (et en partie sur les autres compagnies dans le cas d'une situation de concurrence), et son rôle est d'en améliorer les performances au cours des périodes de simulation à venir. Les cas les plus complexes sont ceux où le participant part de zéro : sa compagnie vient d'être formée et elle n'a donc jamais opéré dans le contexte considéré. Tout ce qui est confié au participant, c'est un ensemble donné de ressources (des véhicules, des terminus, ...) qu'il doit utiliser sans pouvoir s'inspirer d'une "histoire antérieure". Certains cas intermédiaires entre les cas les plus simples et les plus complexes peuvent également être définis. Par exemple, pour les combinaisons D2-S3-N1 et D2-S3-N2, chacune des compagnies considérées peut

avoir déjà desservi une partie seulement des marchés, de sorte que chaque participant ne part pas totalement de zéro sans pour autant bénéficier de l'information beaucoup plus complète qu'il aurait si sa compagnie avait déjà desservi la totalité des marchés considérés.

En résumé, en plus des Niveaux de complexité N1 et N2 définis dans la section précédente (accès ou non au système d'aides à la décision), SIMTRUCK permet d'associer à chaque combinaison D-S-N1 ou D-S-N2 d'autres Niveaux de complexité qui élargissent la gamme des simulations possibles. Ces autres Niveaux ne sont toutefois pas strictement définissables ni même vraiment dénombrables puisqu'ils sont fonction de la très grande diversité des choix possibles en ce qui a trait d'une part à la taille des problèmes et au contexte envisagé, ainsi qu'en ce qui a trait d'autre part à l'histoire passée de la ou des compagnies considérées. Dans la suite de ce rapport, quand nous parlerons d'un Niveau de complexité, nous parlerons donc en fait d'un niveau défini par les choix du maître de jeu relativement à trois "dimensions" : l'accessibilité ou non aux modules NETPLAN et RAO en tant qu'aides à la décision, la taille des problèmes et le contexte, et enfin l'histoire des compagnies. Les notations N1 et N2 seront plus spécifiquement utilisées si nécessaire pour préciser le choix fait quant à l'accessibilité (N1) ou non (N2) aux aides à la décision.

5.6 RÉSUMÉ : STRUCTURE DE GESTION ET STRUCTURE INFORMATIQUE DE SIMTRUCK

Les sections 5.1, 5.4 et 5.5 qui précèdent ont défini la **Structure de gestion** du simulateur, c'est-à-dire la structure à trois paliers qui a été conçue pour permettre l'inclusion et le traitement de plusieurs **Domaines d'étude**, dans le cadre de différentes **Situations de jeu**, avec différents **Niveaux de complexité**. C'est ce que schématise la partie supérieure de la figure 1. Le choix du maître de jeu relativement à ces trois paliers détermine totalement le type de simulation envisagé, c'est-à-dire la combinaison D-S-N qui définit entièrement l'environnement

et les problèmes auxquels sont confrontés le ou les participants, ainsi que leurs responsabilités respectives.

Jusqu'à présent, nos définitions des Domaines, Situations et Niveaux nous ont amené à travailler sur huit combinaisons D-S-N, i.e. sur huit grands types de simulations (qui correspondent en fait à davantage de cas possibles comme on l'a expliqué dans la section 5.5), mais nous pourrons dans la suite de nos travaux élargir la gamme des combinaisons D-S-N possibles, notamment en intégrant au simulateur d'autres Domaines d'étude et d'autres Situations de jeu.

Les deux autres sections précédentes, 5.2 et 5.3, ont quant à elles défini indirectement la **Structure Informatique** du simulateur qui est schématisée dans la partie inférieure de la figure 1. Cette structure, de même que le principe de fonctionnement qui lui est associé, s'applique à n'importe quelle combinaison D-S-N, sauf en ce qui a trait à l'accès aux modules NETPLAN et RAO en tant qu'aides à la décision, accès qui n'est possible que si N=N1. Quatre composantes principales forment cette structure informatique : (i) une **Banque de Données** incluant différents modules qui contiennent l'information décrivant les états successifs du système de transport considéré, de la ou des compagnies en jeu, et de leur environnement, (ii) un **Programme Interactif d'Entrée-Sortie** qui inclut tous les modules ou sous-programmes requis d'une part pour permettre la consultation et l'édition à l'écran des informations de la banque de données (ou pour leur édition, sous une forme appropriée, dans un rapport imprimé), et d'autre part pour assurer la collecte des décisions et tester leur validité et leur cohérence, (iii) un **Programme de Simulation** qui regroupe tous les modules ou sous-programmes requis pour modéliser les relations entre toutes les variables concernées, déterminer les effets des décisions et donc mettre à jour la banque de données à la fin de chaque période de simulation, (iv) un **Système d'Aides à la Décision et à**

l'Evaluation qui inclut différents modules ou sous-programmes, dont les modules NETPLAN et RAO, pour assister le ou les participants dans leurs décisions avant une période de simulation (si N=N1) et pour leur permettre de les évaluer ensuite.

Une précision s'impose, à savoir que, dans le cas du dispatching, le programme de simulation doit également inclure un module qui génère dans le temps et dans l'espace les demandes de transport, i.e. les requêtes pour les cueillettes et livraisons de marchandises. Une partie de ces requêtes sera générée au début de la séance de simulation et sera donc connue à l'avance par l'usager-dispatcheur; l'autre partie sera générée en temps réel simulé, i.e. durant la simulation.

Une autre remarque importante s'impose à l'égard de la structure informatique du simulateur. Cette structure est bien, comme on l'a dit, valide pour toutes les combinaisons D-S-N (sauf du point de vue de l'accès aux aides à la décision, qui n'est possible que si N=N1), mais il est évident que ce ne sont pas les mêmes modules qui interviennent dans les simulations correspondantes. De plus, il est nécessaire de disposer d'un "mécanisme d'initialisation" qui permet la sélection/définition, par le maître de jeu, de la combinaison D-S-N qu'il souhaite. Nous avons ainsi été amenés à définir un **Programme Maître** fort simple mais qui est capital et qui a quatre fonctions. (1) C'est via ce programme que le maître de jeu initialise la simulation en sélectionnant un Domaine d'étude et une Situation de jeu et en définissant le Niveau de complexité. (2) C'est ce programme qui, pour la combinaison D-S-N choisie, détermine les modules d'entrée-sortie et les modules d'aides à la décision et à l'évaluation qui sont accessibles au(x) participant(s). (3) C'est ce programme qui identifie les modules de la banque de données intervenant dans la simulation relative à cette combinaison D-S-N. (4) C'est enfin, et surtout, ce programme qui orchestre la mise en oeuvre des différents modules du programme de simulation qui sont requis pour la combinaison D-S-N choisie. Ces quatre fonctions du Programme Maître sont schématisées dans la figure 1.

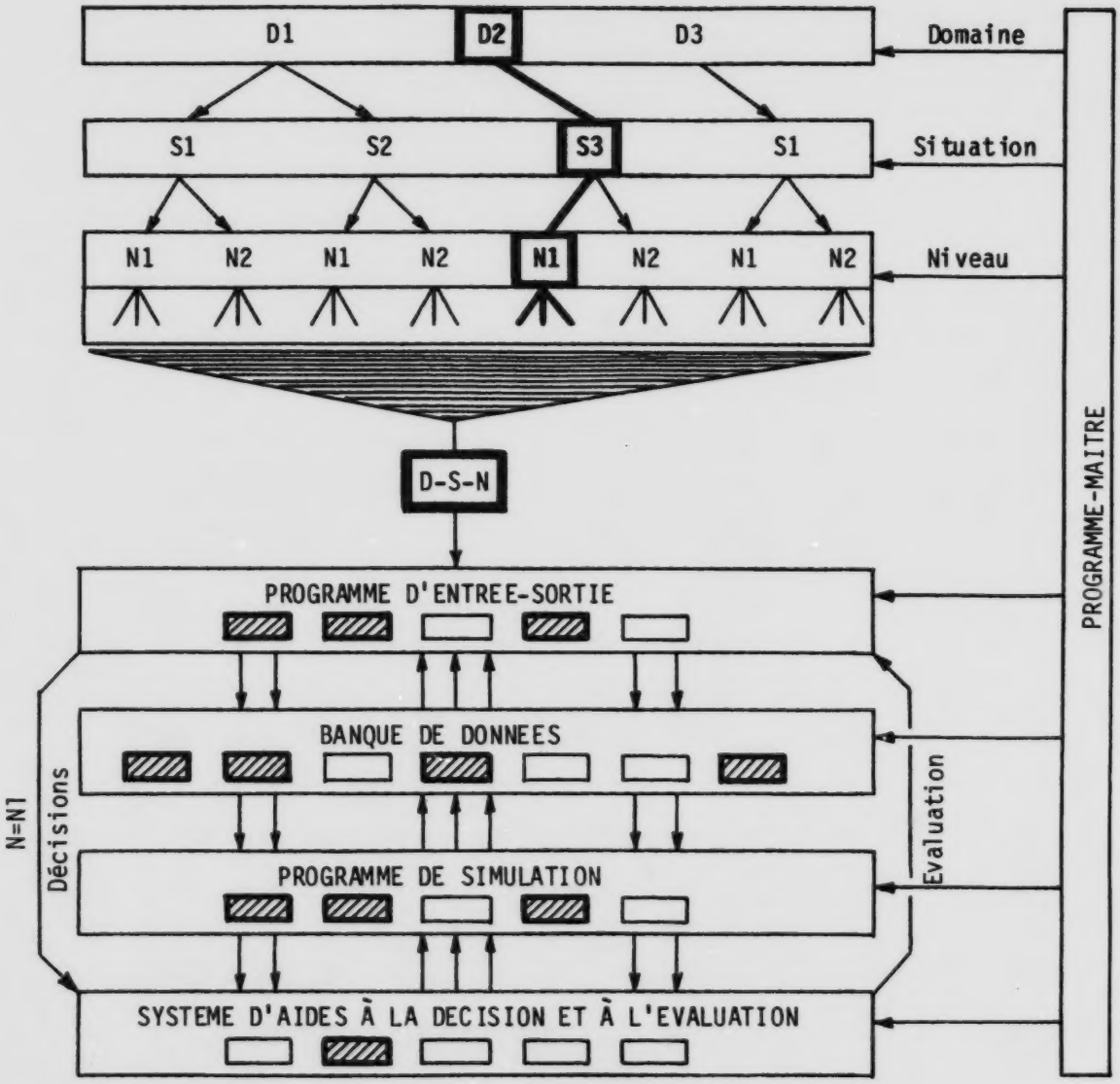


Figure 1. Structure de gestion et structure informatique de SIMTRUCK

6. LE CAS DE LA PLANIFICATION STRATÉGIQUE ET/OU TACTIQUE

Ce chapitre a trait aux problèmes de modélisation mathématique et de développement informatique relatifs aux 6 combinaisons D-S-N définies précédemment qui situent le rôle du ou des participants au niveau de la planification tactique dans la ou les entreprises de camionnage qui lui est ou qui leur sont respectivement confiées, niveau auquel s'ajoute celui de la planification stratégique quand plusieurs entreprises, i.e. plusieurs participants, sont en concurrence et qu'on élargit la gamme des problèmes qui leur sont soumis. Le chapitre 7 sera consacré aux deux autres combinaisons retenues, à savoir celles qui situent l'analyse et la prise de décision au niveau du dispatching.

6.1 DONNÉES DE BASE, VARIABLES DE DÉCISION ET VARIABLES DE SIMULATION

6.1.1 Une seule compagnie. Planification tactique seulement

Les problèmes d'analyse et de prise de décision considérés ici sont ceux définis par les quatre combinaisons D1-S1-N1, D1-S1-N2, D1-S2-N1 et D1-S2-N2.

Les **Données de base** sont :

- la matrice des distances (plus courts chemins) entre les villes considérées;
- les marchés à desservir, chacun étant défini par
  - une paire de villes,
  - un niveau de demande (volume hebdomadaire de marchandises),
  - une norme de service (temps de livraison garanti pour, par exemple, 90% de la marchandises[1]);
- les données technico-économiques définissant différentes tailles de terminus possibles (taux de classification et de déchargement, coûts

---

[1]. Ce taux de fiabilité et certaines autres données de base (par exemple les niveaux des demandes) peuvent être modifiés par le maître de jeu au cours d'une simulation.

unitaires de manutention, etc.); on inclut aussi des données sur les coûts de location de ces différentes tailles de terminus[1].;

- les caractéristiques technico-économiques des véhicules (capacité, vitesse, coût d'opération, ...) qui sont tous identiques et supposés en nombre suffisant pour assurer les services offerts.

Les **Variables de Décision** déterminent :

- le nombre, la localisation et la taille des terminus;
- le réseau des services de transport, chaque service étant défini par
  - son origine et sa destination,
  - sa fréquence hedbomadaire;
- le routing des marchandises qui, pour chaque marché[2], est défini par
  - le ou les itinéraires empruntés par les marchandises (un itinéraire correspond à un service ou à une succession de services),
  - le volume de marchandises sur chaque itinéraire.

Les valeurs des Variables de Décision relatives aux terminus et aux services sont toujours fixées par le ou les participants en jeu. Les valeurs de celles relatives au routing des marchandises sont soit fixées par ce ou ces participants (N=N2), soit déterminées automatiquement (N=N1) par le module d'aide à la décision NETPLAN.

Nous appelons **Variables de Simulation** toutes les autres grandeurs qui ne sont ni des Données de Base, ni des Variables de Décision. Il s'agit donc de toutes les variables dont les valeurs résultent de l'exécution du Programme de Simulation. Elles décrivent en détail les résultats de la simulation, c'est-à-dire plus exactement les activités de la compagnie

---

1. Pour simplifier, on suppose que tous les terminus sont loués.
2. Dans le cadre des quatre combinaisons D1-S-N considérées ici, le ou les participants doivent desservir tous les marchés définis dans les Données de Base.

considérée durant la période de simulation exécutée (6 mois ou 1 an), avec la semaine comme base de référence. En particulier, ces Variables de Simulation fournissent :

- des statistiques sur chaque itinéraire et donc sur la desserte de chaque marché (coût de transport et coût de classification, temps de livraison moyen et variance, fiabilité obtenue par rapport à la norme de service, etc.);
- des informations détaillées sur chaque service (volume transporté, coût, temps d'attente de la marchandise à l'origine du service, temps de déchargement à l'arrivée, ...);
- des informations sur les services additionnels que la compagnie a été éventuellement forcée d'improviser en raison de l'insuffisance des fréquences des services qu'elle a planifiés, c'est-à-dire pour être capable de transporter toutes les marchandises (voir la section 6.5);
- des informations détaillées sur chaque terminus (nombre de camions à l'arrivée et au départ, volume manutentionné, temps et coûts des différentes activités de déchargement, manutention et chargement, etc.),
- des informations synthèses sur l'ensemble du réseau de transport (coût de transport total, coûts relatifs aux terminus, nombre de marchés où les normes de service ont été respectées pour le taux de fiabilité donné, etc.).

Soulignons que si les valeurs des Variables de Décision relatives au routing des marchandises sont déterminées automatiquement par NETPLAN à la place du ou des participants en jeu (on est alors dans le cas où le maître de jeu a choisi N=N1), cela se produit simultanément au calcul des valeurs des Variables de Simulation. En d'autres mots, quand N=N1, l'output complet d'une période de simulation résulte à la fois de l'exécution du Programme de Simulation et du module d'aide à la décision NETPLAN. En fait, c'est le

même programme NETPLAN qui est utilisé une seule fois en jouant simultanément le rôle du module d'aide à la décision et le rôle du module Réseau dans le Programme de Simulation. Tout cela est précisé dans la suite de ce texte.

Remarque : Quand la compagnie est supposée avoir déjà été en opération sur les marchés considérés avant le démarrage d'une simulation, c'est-à-dire quand elle a une histoire (voir section 5.5), tout se passe comme si une période de simulation avait déjà été exécutée à partir des décisions prises par un participant fictif. La banque de données que le ou les participants peuvent consulter avant la période no UN contient alors les valeurs des Variables de Décisions et des Variables de Simulation correspondant à cette période no ZERO antérieure et fictive.

6.1.2 Plusieurs compagnies/participants en concurrence. Planification stratégique et tactique

Les problèmes d'analyse et de prise de décision considérés ici sont ceux définis par les deux combinaisons D2-S3-N1 et D2-S3-N2. Le nombre de compagnies considérées peut varier de 2 à 5. (Un nombre plus grand entraînerait de la confusion dans l'analyse des résultats.)

Les **Données de Base** définies dans la section précédente sont toutes conservées ici (à une exception près), mais cette fois celles relatives aux caractéristiques technico-économiques des véhicules et des terminus s'appliquent à plusieurs compagnies. (On pourra adopter les mêmes caractéristiques pour toutes les compagnies considéréres, ou au contraire adopter des caractéristiques très différentes d'une compagnie à l'autre.) L'exception mentionnée ci-dessus concerne les normes de service qui cette fois deviennent des Variables de Décisions.

Plusieurs autres Données de Base[1] sont ajoutées qui tiennent compte de la plus grande complexité et du plus grand réalisme des simulations considérées ici. Au niveau des compagnies, on inclut des données sur :

- le nombre de véhicules que chacune d'elles possède au départ;
- la situation financière initiale de chacune d'elles (solde en banque, dette, limite de crédit, valeur de la flotte de véhicules);
- les prix d'achat et les tarifs de location[2] des véhicules;
- les prix de revente des véhicules;
- les coûts de marketing sur un marché, quel qu'il soit (avec différents niveaux de coûts correspondant à différents niveaux de marketing);
- etc.

Au niveau du contexte économique et institutionnel, on inclut des données sur :

- le taux de croissance des prix de l'énergie (qui se répercutent sur les coûts d'opération des compagnies);
- les taux d'intérêt et d'emprunt bancaires;
- la réglementation de l'industrie du camionnage (règles tarifaires et contraintes concernant les entrées et sorties des marchés[3]);
- etc.

Les **Variables de Décision** définies dans la section précédente pour une compagnie s'appliquent cette fois à toutes les compagnies en jeu. On y ajoute les Variables suivantes (pour chaque compagnie) :

- le choix des marchés;

---

1. Certaines de ces données sont modifiables par le maître de jeu au cours d'une simulation.
2. La location de véhicules sera éventuellement exprimée sous la forme d'une location de journées de service.
3. Les règles sur les entrées-sorties des marchés seront définies soit pour l'ensemble des compagnies considérées globalement, soit pour chacune d'elles prises individuellement.

- la norme de service déclarée sur chaque marché;
- le tarif pour chaque marché;
- le volume de marchandises maximum que la compagnie accepte de transporter sur chaque marché (sans spécifier ce maximum, la compagnie risque d'être pénalisée; voir la section 6.6.3);
- le nombre de véhicules nouveaux que la compagnie achète;
- le nombre de véhicules qu'elle loue;
- le nombre de véhicules qu'elle revend;
- le niveau (éventuellement nul) de marketing sur chaque marché;
- etc.

Les **Variables de Simulation** définies dans la section précédente s'appliquent également ici à toutes les compagnies en jeu. Plusieurs autres variables y sont ajoutées qui définissent :

- la part de marché acquise par chacune des compagnies sur chaque marché qu'elle dessert, et donc le volume de marchandises transporté par chaque compagnie sur chaque marché;
- les revenus de chaque compagnie sur chaque marché;
- le nombre de véhicules que chaque compagnie a été éventuellement forcée de louer pour assurer les services qu'elle a offerts[1], cela à un tarif de location supérieur au tarif normal;
- les coûts de marketing;
- la fiabilité cumulée de chaque compagnie sur chaque marché[2];
- l'ensemble des revenus et dépenses de chaque compagnie pendant toute la durée de la période de simulation, ainsi que son nouvel état financier

---

1. Les services offerts incluent les services effectivement planifiés et les services éventuellement improvisés; voir section 6.5.
2. Cette grandeur rend compte de la façon avec laquelle, dans le temps, la compagnie a respecté ses engagements du point de vue des normes de service qu'elle a annoncées sur chaque marché; voir la section 6.6.

(solde en banque, dette, valeur de la flotte de véhicules, limite de crédit[1], ...);

- etc.

6.2 TESTS DE VALIDITÉ ET DE COHÉRENCE DES VARIABLES DE DÉCISION

L'une des fonctions principales du Programme Interactif d'Entrée-Sortie défini précédemment est de vérifier la validité et la cohérence des valeurs de certaines des Variables de Décision choisies par le ou les participants présents par rapport :

- aux contraintes qu'imposent différentes Données de Base et/ou les valeurs prises par différentes Variables de Simulation à la fin de la période précédente,
- aux valeurs données à d'autres Variables de Décision.

Quand un test s'avèrera négatif, un message sera automatiquement transmis à l'usager pour l'amener à modifier ses décisions. L'exécution du Programme de Simulation ne sera pas permise tant que le ou les participants en jeu n'auront pas éliminé toutes les incohérences et les invalidités.

6.2.1 Une seule compagnie. Planification tactique seulement

Module de cohérence des marchés

Quand le routing des marchandises est déterminé par le système d'aide à la décision (N=N1), ce module vérifie l'existence d'au moins un itinéraire possible sur chaque marché, c'est-à-dire l'existence entre l'origine et la destination de ce marché d'un service direct ou d'au moins une suite de services[2]. Quand le routing est fixé par le participant (N=N2), ce module

---

1. La limite de crédit est mise à jour en fonction du solde, de la dette et de la valeur de la flotte véhicules.
2. Quand N=N1, ce module, associé à la procédure de génération de services improvisés quand les fréquences sont insuffisantes (voir section 6.5), garantit que toutes les marchandises seront transportées.

vérifie que le total des marchandises sur le ou les itinéraires désignés par le participant est égal au volume total à transporter. (S'il y a une erreur, i.e. si le volume transporté est inférieur ou supérieur au volume à transporter, le système assurera une correction automatique sur chacun des itinéraires, proportionnellement aux volumes désignés par le participant, et un message de correction lui sera immédiatement communiqué.)

Module de cohérence des itinéraires des marchandises, quand N=N2

Ce module vérifie l'existence d'un service entre les deux villes de chaque itinéraire direct, de même que l'existence d'un service entre chacune des paires de villes successives de chaque itinéraire indirect[1].

Module de cohérence des services

Ce module vérifie l'existence de terminus à l'origine et à la destination de chaque service.

Remarque: Un terminus peut exister dans une ville qui n'est ni l'origine ni la destination d'aucun marché. Un tel terminus peut être utile pour fins de classification/consolidation seulement.

6.2.2 Plusieurs compagnies/participants en concurrence. Planification stratégique et tactique

Les trois modules identifiés ci-dessus s'appliquent à chaque compagnie. Toutefois, le module de cohérence des marchés ne s'applique qu'aux marchés que la compagnie choisit de desservir, et ce module vérifie également l'existence d'un tarif et d'une norme de service pour chacun de ces marchés. Les autres modules importants sont les suivants.

---

[1]. Quand N=N2, ce module, associé au module de cohérence des marchés et à la procédure de génération de services improvisés garantit que toutes les marchandises seront transportées.

Module de validité des achats de véhicules

Ce module vérifie l'existence d'un solde bancaire suffisant pour réaliser les achats proposés.

Module de validité des emprunts

Ce module vérifie que la dette ne dépasse pas ou ne va pas dépasser la limite de crédit. S'il y a dépassement, le nouvel emprunt ou la partie de cet emprunt qui entraîne le dépassement de la limite de crédit est toujours autorisé, mais à un taux d'emprunt très supérieur au taux normal.

6.3 MODULES DE SIMULATION

Lorsque tous les tests de validité et de cohérence des décisions prises par le ou les participants concernés s'avèrent positifs, l'exécution du Programme de Simulation (et du module d'aide à la décision, quand N=N1) peut être réalisée. C'est ce qu'illustre la figure 2. Cette figure définit les quatre modules du Programme de Simulation requis pour les six combinaisons D-S-N dont nous parlons depuis le début du chapitre 6. Elle décrit également, de façon schématique, le déroulement du Programme; en particulier, elle identifie les principales Variables de Décision (voir les "boîtes" localisées dans la partie gauche de la figure) qui constituent les inputs des quatre Modules en question, et elle résume les principales informations produites par les Variables de Simulation (partie droite de la figure) qui constituent les outputs de ces différents modules.

Les quatre Modules en question sont le **Module de Répartition de la Demande, le Module de Réseau, le Module de Flotte de Véhicules et le Module Financier.** Seul le Module de Réseau (et simultanément le module d'aide à la décision, si N=N1) intervient dans les 6 combinaisons D-S-N considérées; il correspond au niveau tactique du processus de prise de décision, lequel niveau est par définition pris en compte dans les 6 combinaisons. Les 3 autres modules n'interviennent que pour les 2 combinaisons D2-S3-N1 et D2-S3-N2 relatives à la situation de concurrence, où l'on traite des

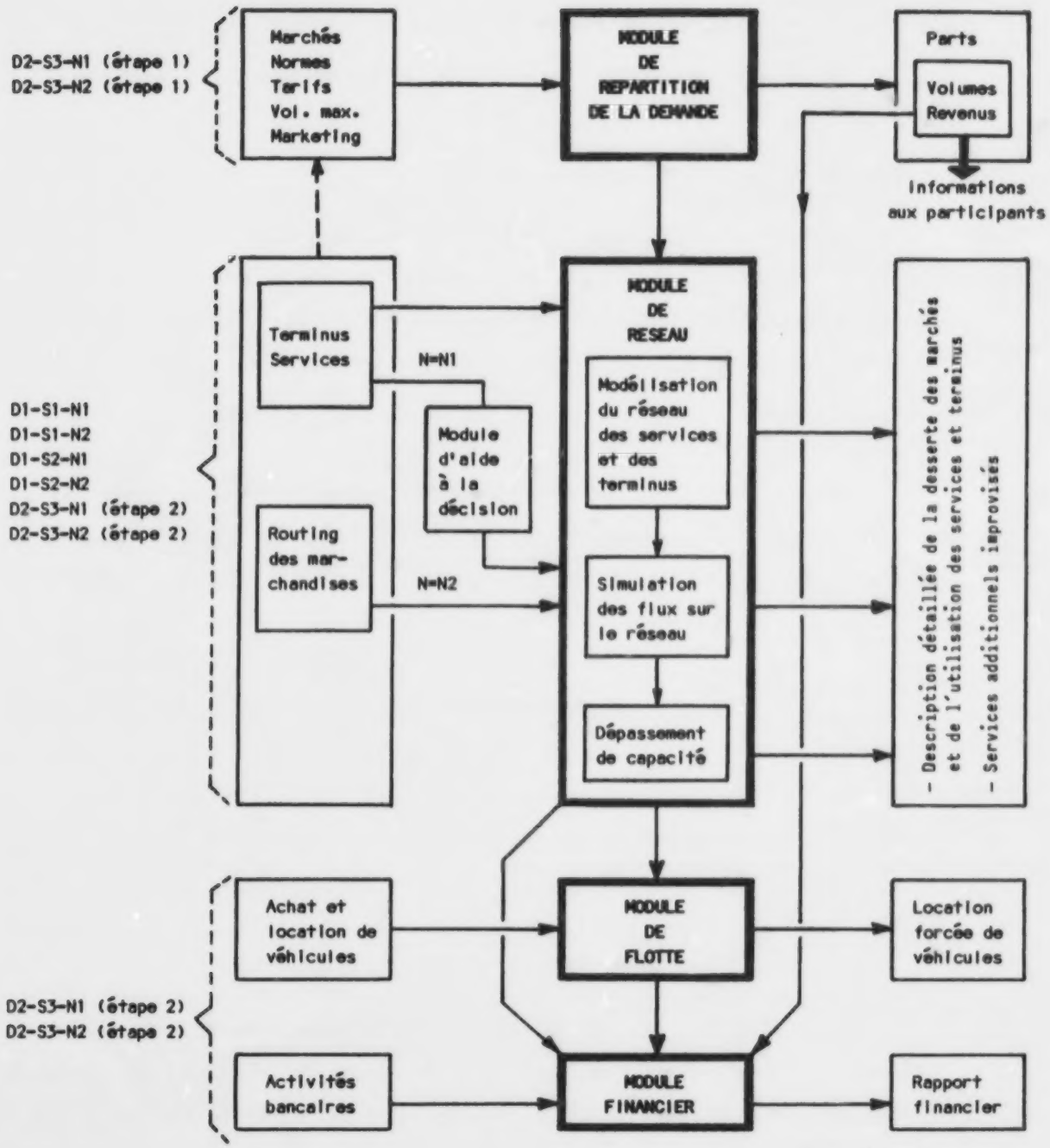


Figure 2. Modules de simulation de SIMTRUCK pour les combinaisons D-S-N relatives à la planification stratégique et/ou tactique

questions de planification stratégique en plus de celles relatives au niveau tactique.

6.3.1 Une seule compagnie. Planification tactique seulement

Le **Module de Réseau** est le seul à intervenir dans les simulations relatives aux quatre combinaisons en question ici : pour les combinaisons D1-S1-N1 et D1-S1-N2, c'est-à-dire celles avec un seul participant, il n'intervient qu'une seule fois; pour les combinaisons D1-S2-N1 et D1-S2-N2 avec plusieurs participants en parallèle, il intervient autant de fois qu'il y a de participants puisque dans ce cas tout se passe comme si on traitait plusieurs simulations (plusieurs compagnies) en parallèle.

Ce Module a trois fonctions principales : (1) Il modélise le réseau de transport (arcs et noeuds) et les activités correspondant aux services et aux terminus définis par le participant concerné. (2) Il simule les déplacements des marchandises de chaque marché sur les services et au travers des terminus, que ces déplacements proviennent d'un routing automatique déterminé par le module d'aide à la décision (N=N1) ou d'un routing décidé par le participant concerné. (3) Il identifie les éventuels dépassements de capacité, lesquels, s'il y en a, donnent lieu à l'ajout de "services improvisés" dont les performances en termes de délais de livraison sont évidemment moins bonnes que celles des services effectivement planifiés, mais qui sont saturés.

6.3.2 Plusieurs compagnies/participants en concurrence. Planification stratégique et tactique

Pour les deux combinaisons D2-S3-N1 et D2-S3-N2 considérées ici, la prise de décision et conséquemment l'exécution du Programme de Simulation doit être divisée en deux étapes.

Première étape

Tous les participants prennent leurs décisions de "nature commerciale" : choix des marchés, et pour chacun d'eux, choix d'un tarif, d'une norme de service et d'un niveau de marketing et définition du volume de marchandises maximum que la compagnie accepte de transporter.

Suite à ces décisions, intervient le **Module de Répartition de la Demande** qui est appliqué à chaque marché, en considérant simultanément toutes les compagnies concernées, de façon à déterminer la part de chacune d'elles sur ce marché, et donc le volume de marchandises qu'elle va y transporter. Ce calcul permet donc également de déterminer le revenu associé à chaque marché.

À la fin de cette première étape, les informations ainsi obtenues pour chaque compagnie sont transmises à chaque participant concerné (sauf celles relatives aux parts de marchés qui demeurent "cachées" jusqu'à la fin de la deuxième étape). Cette première étape correspond donc en quelque sorte à ce qui se passe dans la réalité quand les gestionnaires d'entreprises de camionnage prospectent les marchés, proposent des tarifs et des délais de livraison (normes de service), etc., et qu'ils en arrivent ainsi à signer des contrats. Bien sûr, dans la réalité, ce processus est étalé dans le temps et se répète plusieurs fois par année, mais il reste que, grosso modo, chaque compagnie est plus ou moins capable d'anticiper une ou deux fois par année les volumes qu'elle va transporter sur chaque marché même si en cours d'année elle est amenée à ajuster ses activités aux fluctuations de la demande (ce qui relève en fait d'un niveau de décision différent du niveau de la planification stratégique et tactique où l'on se place ici). Bref, nous avons résumé les "négociations commerciales et ententes de services" dans une seule et même première étape après laquelle les participants peuvent prendre leurs décisions de nature plus "technique".

Deuxième étape

Le **Module de Réseau** qui intervient ici a exactement les mêmes fonctions que celles définies dans la section 6.3.1. Bien entendu, comme les deux autres modules ci-dessous, il est appliqué à chacune des compagnies prises individuellement.

Le **Module de Flotte** a deux fonctions principales : (i) Il enregistre les coûts des achats et locations de véhicules. (ii) Il vérifie si la flotte de véhicules a une taille suffisante pour assurer les services offerts[1] sur l'ensemble du réseau, ce qui, en cas d'un nombre insuffisant de véhicules, se traduit par la location forcée de véhicules additionnels, à un tarif supérieur au tarif de location "normal".

Le **Module Financier** résume tous les coûts et revenus de la compagnie pour la période de simulation considérée, et en conséquence il procède à la mise à jour de sa situation financière, tout cela sous la forme d'un rapport financier détaillé semblable à celui qu'on peut trouver dans une véritable compagnie de transport.

Remarque

La flèche verticale en pointillé dans la partie supérieure gauche de la figure 2 signifie que, en prenant leurs décisions lors de la deuxième étape sur les services et les terminus (ainsi que sur le routing des marchandises, quand N=N2), certains participants peuvent être amenés à souhaiter une révision des décisions qu'ils ont prises dans la première étape. Le maître de jeu peut effectivement autoriser une telle révision, auquel cas le processus recommence au niveau de la première étape, ce qui entraîne un nouveau calcul de la répartition des demandes sur les marchés, etc.

---

[1]. Les services offerts incluent les services planifiés et les services improvisés.

6.4 LE MODULE DE RÉSEAU, LE MODULE D'AIDE À LA DÉCISION ET LE MODULE D'ÉVALUATION

Dans la section 6.1.1, nous avons indiqué que c'est un même programme, à savoir NETPLAN, qui simultanément joue le rôle du Module de Réseau défini ci-dessus et le rôle du Module d'Aide à la Décision pour la détermination automatique (quand N=N1) du routing des marchandises. Auparavant, dans la section 5.3, nous avions également indiqué que c'est aussi NETPLAN qui peut être utilisé comme Module d'Evaluation, c'est-à-dire qui permet la détermination de "solutions optimales ou sous-optimales" dont les performances peuvent être utilisées comme références pour l'évaluation a posteriori des décisions du ou des participants en jeu.

Dans ce qui suit, après avoir présenté NETPLAN, nous expliquons comment il assure ce triple rôle dans notre simulateur.

6.4.1 Présentation de NETPLAN

NETPLAN est l'une des versions, parmi d'autres, d'un logiciel qui a été développé au cours des années passées par T. Crainic et J. Roy[1] (réf. [1]) pour traiter simultanément les deux problèmes centraux de planification tactique dont nous avons parlé jusqu'ici, à savoir le problème du design d'un réseau de services (configuration et fréquences) et celui du routing des marchandises (itinéraires et volumes) dans ce réseau. Il était donc logique de penser à l'intégration de NETPLAN dans notre simulateur SIMTRUCK.

NETPLAN est basé sur un modèle de programmation non linéaire qui peut être formalisé comme suit :

$$\underset{R,F(S),S}{\text{Minimiser}} \quad X[R,F(S),S,T,H] = Y[F(S),S] + Z[R,T] + PH[R,F(S),S,T,H] + PC[R,F(S),S]$$

---

[1]. Louis Delorme a également contribué au développement de ce logiciel.

tel que $S \subset SP$

$R \leftrightarrow S$ et $T \leftrightarrow SP$ (explication dans le texte qui suit)

$\sum_k R_k^m = D^m$ pour tous les m

$F_S > 0$ et entier pour tous les $s \in S$

où $S=\{s\}$ = un ensemble de services (arcs) qui définit une configuration du réseau de transport

SP = ensemble donné des services possibles; cet ensemble définit donc le réseau "maximum" possible qui inclut implicitement toutes les configurations possibles

$F(S)=\{F_s\}$ = ensemble des fréquences des services du réseau S

F_s = fréquence du service s

$R=\{R_k^m\}$ = routing des marchandises

R_k^m = flux de marchandises sur l'itinéraire k relatif au marché m

T = ensemble des terminus (définis par leur nombre, leur localisation et leur taille)

$H=\{H^m\}$ = ensemble des normes de service

H^m = norme de service pour le marché m (e.g. temps maximum pour, par exemple, 90% de la marchandise[1])

Y = coût total des services de transport

Z = coût total aux terminus

PH = coût (pénalité) pour dépassement des normes de services

PC = coût (pénalité) pour dépassement des capacités de service

D^m = demande relative au marché m (volume à transporter)

Soulignons, avant d'expliquer ce modèle, que **son utilisation suppose que les ensembles T et H sont donnés (i.e. exogènes au modèle).** Ces deux ensembles apparaissent toutefois explicitement dans la fonction

---

[1]. Dans SIMTRUCK, ce taux de fiabilité est fixé par le maître de jeu.

objectif X pour indiquer que, dans SIMTRUCK, les choix relatifs aux terminus (nombre, localisations et tailles) et, pour certaines combinaisons[1] D-S-N, les choix relatifs aux normes de service constituent aussi des variables de décision fixées par le ou les participants concernés. En d'autres mots, ces deux ensembles T et H pourraient ne pas apparaître dans la fonction objectif puisqu'ils sont fixés extérieurement chaque fois qu'on utilise NETPLAN, mais nous les avons fait apparaître explicitement pour signifier qu'ils représentent des variables de décision accessibles aux participants, au même titre que les ensembles R, F(S) et S.

La fonction objectif X [R,F(S),S,T,H] regroupe quatre catégories de coût. Y[F(S),S] représente le coût total des services de transport, c'est-à-dire l'ensemble des coûts d'opération pour assurer les déplacements des camions sur le réseau défini par la configuration S avec les fréquences définies par F(S). Les coûts de déchargement, classification et chargements des marchandises aux terminus sont représentés par Z[R,T], qui indique que ces coûts sont fonction des tailles et donc caractéristiques technico-économiques des terminus, ainsi que des volumes de marchandises qui y sont manutentionnées. Le coût PH [R,F(S),S,T,H] pénalise les temps de livraison qui dépassent les temps "garantis" (i.e. les normes H), ces temps de livraison incluant non seulement les temps de déplacements proprement dits des camions mais aussi les retards subis par ces camions et les marchandises suite aux opérations et problèmes de congestion dans les terminus; les temps de livraison tiennent compte aussi des éventuels problèmes de congestion (dépassement de capacité) au niveau des services, problèmes qui entraînent des retards supplémentaires dans les mouvements des camions. Les problèmes de congestion au niveau des services sont également pris en compte dans le coût PC [R,F(S),S] qui pénalise les flux du routing R qui dépassent les capacités des services correspondant à S et F(S).

---

[1]. Le symbole S (pour Situation de jeu) dans un triplet D-S-N n'a évidemment rien à voir avec le symbole S utilisé ici pour désigner les services de transport.

En résumé, la fonction objectif du modèle représente un arbitrage entre d'une part les coûts d'opération relatifs aux véhicules sur le réseau et à la manutention des marchandises dans les terminus, et d'autre part la qualité des services qui est fonction de la congestion et des délais encourus par les véhicules et les marchandises sur le réseau et aux terminus.

SP, tel qu'indiqué, représente l'ensemble des services définis comme possibles, qui définissent le réseau "maximum" possible. Cela peut être le réseau "complet", c'est-à-dire celui incluant un service dans chaque direction entre chaque paire de terminus, ou tout autre sous-ensemble défini au préalable. La condition $S \subset SP$ signifie que tout service s sélectionné par le modèle est nécessairement un service défini comme possible.

La condition $T \leftrightarrow SP$ signifie qu'il existe un terminus en chaque origine et chaque destination d'un service possible. La condition $R \leftrightarrow S$ signifie que le routing des marchandises doit être compatible avec le réseau des services, c'est-à-dire que tout itinéraire de marchandises doit nécessairement emprunter des services $s \in S$.

La condition $\sum_k R_k^m = D^m$ indique que la totalité des marchandises de chaque marché m sont effectivement transportées via des itinéraires k où, sur chacun d'eux, le volume transporté est R_k^m.

Les conditions relatives aux variables F_s indiquent que les fréquences de service sont nécessairement entières ou nulles; la valeur $F_s=0$ indique que le service s n'est pas retenu.

6.4.2 Définition des Etats du système de transport

Nous appelons **"Etat du système de transport"** de la compagnie considérée tout ensemble de valeur $\{R,F(S),S,T,H\}$. Un tel ensemble définit entièrement les "activités transport" de la compagnie, son réseau de services/terminus et les flux sur ce réseau; il détermine également la mesure dans laquelle les normes de service sont respectées.

Pour T et H fixés (ce qui est toujours le cas, comme on l'a dit ci-dessus, quand on utilise NETPLAN), et pour SP = le réseau complet noté SPC, le modèle présenté plus haut détermine simultanément une configuration optimale S*** $\subset$ SPC du réseau des services, leurs fréquences optimales F***(S***) et un routing optimal R***. Nous appelons l'état correspondant obtenu {R***,F***(S***), S*** $\subset$ SPC, T,H} **l'Etat globalement optimal** du système de transport puisqu'il résulte d'une optimisation par rapport au maximum de degrés de liberté, c'est-à-dire à la fois par rapport au routing, aux fréquences et à la configuration du réseau, cette dernière étant déterminée à partir de **toutes** les configurations possibles représentées par le réseau complet SPC. Cette optimisation peut être schématisée comme suit :

$$T,H,SP = SPC \xrightarrow{\text{NETPLAN}} \{R^{***},F^{***}(S^{***}),S^{***} \subset SPC,T,H\} \text{ globalement optimal}$$

Pour T,H et SP $\neq$ SPC fixés, c'est-à-dire pour un réseau "maximum" possible incluant moins de services que le réseau "complet", le modèle détermine une configuration optimale S** $\subset$ SP, des fréquences optimales F**(S**) et un routing optimal R**, c'est-à-dire une solution sous-optimale par rapport à celle obtenue dans le cas précédent puisque la sélection de la configuration du réseau est réalisée à partir d'un ensemble plus petit de services possibles. On obtient ainsi ce que nous appelons un **Etat sous-optimal de degré 1:**

$$T,H,SP \neq SPC \xrightarrow{\text{NETPLAN}} \{R^{**},F^{**}(S^{**}),\ S^{**} \subset SP,T,H\} \text{ sous-optimal de degré 1}$$

Pour T,H,S et F(S) fixés, le réseau des services est totalement défini a priori en termes de configuration et de fréquences. Le nombre de degrés de liberté est donc sensiblement réduit puisque l'optimisation ne porte plus que sur le routing des marchandises : le modèle produit un routing optimal R* qui détermine ainsi un Etat sous-optimal de degré 2:

$$T,H,S,F(S) \xrightarrow{\text{NETPLAN}} \{R^{*},F(S),S,T,H\} \text{ sous-optimal de degré 2.}$$

Pour T,H,S,F(S) et R fixés, il n'y a plus d'optimisation possible, puisque l'état du système est entièrement défini. Le logiciel NETPLAN peut alors être utilisé comme un simple système de simulation/comptabilisation qui fournit une description détaillée de toutes les activités de la compagnie et des flux de marchandises sur l'ensemble de son réseau et aux terminus, ceci incluant l'identification des éventuels dépassements des capacités de service (voir section 6.5). Bien sûr, cette description détaillée est également produite dans les cas précédents où il y a optimisation.

6.4.3 Utilisation de NETPLAN dans SIMTRUCK

Dans le dernier cas ci-dessus, i.e. celui où tous est fixé de façon exogène, NETPLAN joue exactement le rôle du **Module de Réseau** défini précédemment, cela pour toutes les combinaisons D-S-N, sauf celles où N=N1.

Pour les combinaisons où N=N1, c'est l'avant dernier cas ci-dessus, i.e. celui où tout est fixé sauf le routing et où l'on détermine un état sous-optimal de degré 2, qui décrit le rôle de NETPLAN dans SIMTRUCK. Dans ce cas, NETPLAN joue simultanément le rôle du **Module de Réseau** et celui du **Module d'Aide à la Décision** : c'est le même programme qui détermine automatiquement le routing des marchandises à la place du participant concerné et qui assure la simulation/comptabilisation des activités de la compagnie.

Les deux autres cas considérés dans la section précédente, i.e. celui où l'on produit un Etat sous-optimal de degré 1 et celui où l'on produit un Etat globalement optimal, correspondent à l'utilisation de NETPLAN comme **Module d'Evaluation**. Ces deux Etats sont en effet théoriquement "meilleurs" (i.e. plus optimaux) que tous ceux que peut déterminer le participant responsable de la compagnie considérée. Les performances globales de ces deux Etats (en termes de coûts et de qualité de service) peuvent donc être utilisées pour évaluer les Etats correspondants aux décisions du participant. Dans l'avant-dernier cas de la section précédente, i.e. celui

où tout est fixé sauf le routing, l'Etat sous-optimal de degré 2 obtenu peut également être utilisé pour évaluer les décisions du participant dans toutes les combinaisons D-S-N où il est responsable du routing (i.e. N=N2). Tout cela est précisé dans ce qui suit.

Nous appelons **Variables d'Etat** les variables qui définissent l'Etat du système de transport d'une compagnie. Il s'agit donc des variables R, F(S), S, T et H. Selon la combinaison D-S-N considérée, ces Variables d'Etat sont ou non des Variables de Décision.

Nous appelons **Tactique d'un participant** tout ensemble de valeurs des Variables d'Etat accessibles à ce participant pour la combinaison D-S-N considérée. Il s'agit en d'autres mots des variables sur lesquelles il peut effectivement prendre des décisions en termes de planification tactique. Nous appelons **Tactique globalement optimale ou sous-optimale** tout ensemble correspondant des valeurs des Variables d'Etat qui détermine un Etat globalement optimal ou sous-optimal.

Combinaisons D1-S1-N1 et D1-S2-N1

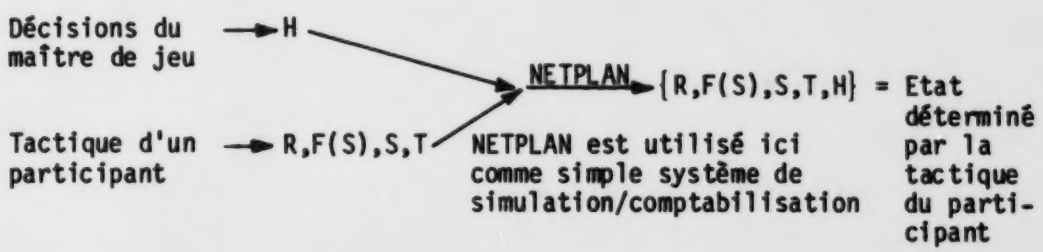
T,H,SP=S(≠SPC) NETPLAN → {R**,F**(S**),S** ⊂ S,T,H} = Etat sous-optimal de degré 1

T,H,SP=SPC NETPLAN → {R***,F***(S***),S*** ⊂ SPC,T,H} = Etat globalement optimal

La description détaillée de l'Etat déterminé par la Tactique d'un participant (il s'agit en fait d'un Etat sous-optimal de degré 2) et sa comparaison avec les performances globales de l'Etat sous-optimal de degré 1 et de l'Etat globalement optimal permet à ce participant d'analyser et d'évaluer sa Tactique. Il est à noter que la configuration S** dans l'Etat sous-optimal de degré 1 est construite à partir de T et S, c'est-à-dire à partir des terminus et de la configuration du réseau fixés par le participant. L'Etat globalement optimal conserve seulement les terminus T fixés par le participant.

S'il le souhaite, le maître de jeu peut donner accès non seulement aux performances globales de l'Etat sous-optimal de degré 1 et de l'Etat globalement optimal, mais aussi à une description plus détaillée de ces deux Etats. Dans ce cas, le participant peut en détail comparer sa Tactique [F(S),S,T], qui est sous-optimale de degré 2, à la Tactique [F**(S**), S**,T] sous-optimale de degré 1 et à la Tactique [F***(S***),S***,T] globalement optimale.

Combinaisons D1-S1-N2 et D1-S2-N2



T,H,S,F(S) NETPLAN → {R*,F(S),S,T,H} = Etat sous-optimal de degré 2

T,H,SP=S(≠SPC) NETPLAN → {R**,F**(S**),S** ⊂ S,T,H} = Etat sous-optimal de degré 1

T,H,SP=SPC NETPLAN → {R***,F***(S***),S*** ⊂ SPC,T,H} = Etat globalement optimal

La description détaillée de l'Etat déterminé par la Tactique d'un participant et sa comparaison avec les performances globales des Etats sous-optimaux de degré 1 et 2 et de l'Etat globalement optimal permet à ce participant d'analyser et d'évaluer sa Tactique. Il est à noter que l'Etat sous-optimal de degré 2 inclut les terminus T et le réseau (configuration S, fréquences F(S)) fixés par le participant. De même, comme dans le cas précédent, l'Etat sous-optimal de degré 1 est construit à partir des terminus T et de la configuration S qu'il a choisis, alors que l'Etat globalement optimal conserve seulement les terminus.

Comme plus haut, le maître de jeu peut donner accès aux descriptions détaillées des deux Etats sous-optimaux et de l'Etat globalement optimal (i.e. pas seulement à leurs performances globales). Dans ce cas, le participant peut comparer en détail sa Tactique [R,F(S),S,T] aux deux Tactiques sous-optimales [R*,F(S),S,T] et [R**,F**(S**),S**,T] et à la Tactique globalement optimale [R***,F***(S***),S***,T].

Combinaisons D2-S3-N1 et D2-S3-N2

Pour la combinaison D2-S3-N1, l'utilisation de NETPLAN est semblable à celle décrite pour les combinaisons D1-S1-N1 et D1-S2-N1.

Pour la combinaison D2-S3-N2, l'utilisation de NETPLAN est semblable à celle décrite pour les combinaisons D1-S1-N2 et D1-S2-N2.

La seule différence pour ces deux combinaisons D2-S3-N1/N2 concerne les normes de service H. Cette fois, au lieu d'être fixées par le maître de jeu, elles font partie des Tactiques des participants.

6.5 DÉPASSEMENT DES CAPACITÉS DE SERVICE ET TEMPS DE CALCUL

6.5.1 Présentation des problèmes

Lorsque le programme informatique traduisant le modèle NETPLAN est utilisé :

- soit avec T et H fixés et avec SP=SPC, c'est-à-dire pour déterminer un Etat globalement optimal,
- soit avec T,H et SP ≠SPC fixés, c'est-à-dire pour déterminer un Etat sous-optimal de degré 1,

il n'y a pas de problèmes de dépassement des capacités de service. Ces dépassements sont pénalisés par le coût PC[R,F(S),S] dans la fonction objectif X de sorte qu'en fait ils ne se produisent jamais puisque, dans ces deux optimisations, le routing R, la configuration S du réseau et les fréquences correspondantes F(S) sont endogènes : NETPLAN détermine un routing et un réseau avec des fréquences suffisantes pour ne pas donner lieu à des dépassements de capacité. Par contre, lorsque NETPLAN est utilisé :

- soit avec T, H, S et F(S) fixés, c'est-à-dire pour déterminer le routing des marchandises R et l'Etat sous-optimal de degré 2 correspondant,
- soit avec T, H, S, F(S) et R fixés, c'est-à-dire comme simple système de simulation/comptabilisation,

des dépassements de capacité peuvent se produire. Dans le premier cas, le coût PC [R,F(S),S] pénalise effectivement les dépassements de capacité, mais le modèle n'a plus la liberté d'ajuster le réseau des services en même temps que le routing des marchandises puisque S et F(S) sont fixés de façon exogène : certains itinéraires impliquant des dépassements de capacité sur certains services peuvent s'avérer moins coûteux (du point de vue des critères de la fonction objectif) que des itinéraires sans dépassement de capacité mais beaucoup plus long. Il se peut aussi que tous les itinéraires possibles sur certains marchés empruntent des services de capacités insuffisantes; des dépassements de capacité se produisent alors inéluctablement. A fortiori, dans le second cas, c'est-à-dire quand tout est fixé de façon exogène, y compris le routing des marchandises, de tels dépassements peuvent être fréquents.

Ces dépassements de capacité ne constituent pas vraiment un problème quand NETPLAN est utilisé ce pour quoi il a été conçu, c'est-à-dire dans le contexte d'une véritable compagnie qui s'en sert pour planifier ses activités. Dans un tel contexte, si le responsable de la planification décide de tester différentes tactiques en fixant lui-même les services et leurs fréquences et que cela conduit à des dépassements de capacités, il lui suffit d'augmenter les fréquences choisies pour éliminer ces problèmes. Quant à l'utilisation de NETPLAN comme simple système de simulation/ comptabilisation, elle n'était tout simplement pas prévue; c'est au cours de nos travaux sur SIMTRUCK que NETPLAN a été modifié pour inclure cette possibilité.

Il reste que, dans le cadre de notre simulateur, ces dépassements de capacité constituaient un réel problème. Comment en effet donner une interprétation à ces dépassements en réalité physiquement impossibles puisque les camions ont des capacités limites ? Pour un utilisateur peu familier avec des modèles comme NETPLAN, cela aurait conduit à de sérieuses difficultés d'interprétation.

Nous avons constaté par ailleurs, dans le cadre de nos nombreux tests sur NETPLAN, que les problèmes de capacité ci-dessus, dans le cas où le réseau des services est donné et qu'il y a optimisation du routing des marchandises, étaient souvent accompagnés d'une augmentation importante, voire considérable, des temps d'exécution du programme informatique. Ce phénomène trouve son explication dans le fonctionnement itératif de l'algorithme utilisé pour résoudre le modèle : lorsque, en cours d'exécution, les itinéraires identifiés sur certains marchés deviennent saturés, l'algorithme embarque parfois dans un long travail d'exploration de nouveaux itinéraires et de ceux déjà identifiés pour essayer d'affecter les excédents de marchandises; cette exploration itérative peut s'avérer très fastidieuse et

même déboucher sur des itinéraires quasi invraisemblables. Dans le contexte d'un travail de planification réel où NETPLAN est utilisé dans une vraie compagnie avec un grand réseau de transport, le temps d'exécution supplémentaire requis pour cette exploration reste relativement acceptable par rapport au temps d'exécution normal et par rapport au temps de toute façon prévu pour le travail de planification. De plus, il est toujours possible d'interrompre l'exécution pour modifier les services et ensuite recommencer l'exécution. Par contre, dans le cadre d'un simulateur comme SIMTRUCK, des temps d'exécution trop longs sont inacceptables.

Ces problèmes de temps d'exécution et de dépassement des capacités ont été résolus en introduisant le concept de **"services improvisés"** représentant des **services additionnels** qui sont ajoutés à l'improviste quand les services (et donc les itinéraires) planifiés par la compagnie s'avèrent insuffisants. Evidemment, au même titre que les services planifiés, ces services improvisés peuvent donner lieu à la location forcée de véhicules additionnels si les véhicules disponibles sont en nombre insuffisant; ceci ne concerne toutefois que les simulations où l'on tient compte explicitement de la taille des flottes de véhicules, i.e. celles impliquant le niveau stratégique du processus de prise de décision (combinaisons D2-S3-N1 et D2-S3-N2).

Dans la section qui suit, nous présentons les résultats de ces travaux dans le cas où le routing des marchandises est endogène (i.e. déterminé par NETPLAN). La section 6.5.3 sera consacrée au cas où NETPLAN est utilisé comme simple système de simulation/comptabilisation.

6.5.2 Services improvisés quand le routing des marchandises est endogène

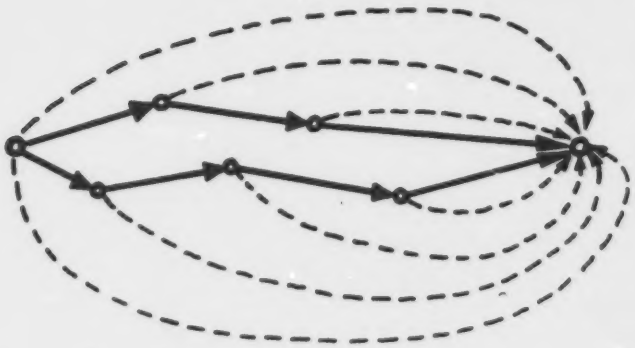
Trois approches ont été considérées pour modéliser les services improvisés.

La première approche (figure 3(a)) consiste à ajouter systématiquement, avant éxécution du programme, un service fictif entre l'origine et la destination de chaque marché : quand les itinéraires d'un marché donné s'avèrent "bloqués" (parce que un ou plusieurs des services planifiés sur ces itinéraires sont saturés), les marchandises excédentaires peuvent être déviées sur le service fictif correspondant, qui devient alors un service effectivement improvisé. Cette approche a l'avantage de la simplicité (le réseau fictif contient peu d'arcs et l'implantation informatique de la procédure de détournement est simple puisqu'elle s'applique marché par marché), mais elle manque de réalisme car en fait le détournement des marchandises ne devrait se produire qu'à l'endroit des services saturés, qui ne sont pas nécessairement ceux localisés à l'origine du marché considéré.

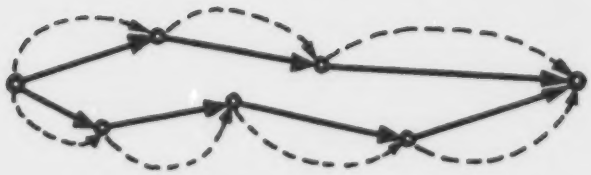
La deuxième approche (figure 3(b)) consiste à ajouter, sur chaque itinéraire généré pendant l'exécution du programme, un service fictif entre chaque terminus de cet itinéraire et le terminus de destination : dans ce cas, quand un ou des services s'avèrent saturés, l'idée est de dévier les marchandises excédentaires sur le service fictif dont l'origine coïncide avec celle du premier service saturé sur l'itinéraire considéré. Comme dans la première approche, ce service fictif correspond alors à un service effectivement improvisé. Cette approche, plus complexe à implanter (puisque la construction des services fictifs se fait itinéraire par itinéraire, en cours d'exécution du programme), est plus réaliste sans l'être totalement car les marchandises une fois déviées restent sur le service fictif jusqu'à leur destination finale alors qu'en réalité la suite du déplacement (après le service saturé) pourrait se faire en réempruntant les autres services planifiés s'ils ne sont pas eux aussi saturés.

La troisième approche (figure 3(c)), qui est celle que nous avons retenue, consiste à associer systématiquement un service fictif à chaque

- (a) -



- (b) -



- (c) -

Figure 3 : Modélisation des services fictifs

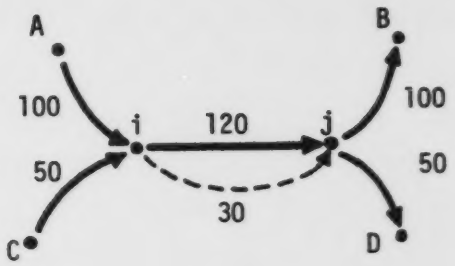
service planifié : dans ce cas, quand un ou des services planifiés deviennent saturés, l'idée est de détourner les marchandises excédentaires exactement à l'endroit des services saturés, et là seulement; des marchandises déviées sur un service fictif vont réemprunter les services planifiés suivants s'ils ne sont pas saturés.

L'implantation de cette approche, dont l'avantage est de localiser avec précision tous les services saturés et de limiter la longueur (et donc le coût) des services improvisés, a soulevé trois problèmes importants. Le premier, le plus simple, a porté sur l'identification des services fictifs devant effectivement être pris en compte; à cette fin, il a suffit d'ajouter dans le programme des conditions sur les volumes affectés en cours d'exécution de façon à ce que chaque service fictif ne soit considéré comme un service effectivement improvisé que lorsque le service planifié correspondant devient saturé.

Le deuxième problème a porté sur le choix des attributs (fréquence, capacité, temps et coût) des services fictifs : il fallait éviter que des itinéraires les incluant soient systématiquement empruntés à la place d'autres itinéraires plus longs mais incluant seulement des services planifiés, sans pour autant donner trop de chance à ces autres itinéraires, surtout quand ils sont vraiment trop longs et donc invraisemblables. Cette "calibration" des attributs des services fictifs a été réalisée dans le cadre de différents tests jusqu'à l'obtention des résultats les plus plausibles.

Le troisième problème est apparu au niveau de l'analyse détaillée des itinéraires de marchandises. On s'est rendu compte en effet que, en raison de la procédure de résolution de NETPLAN (à chaque itération, l'algorithme traite les marchés les uns après les autres, dans un ordre préétabli), les marchandises relatives à des marchés différents ne sont pas traitées de façon uniforme, avec pour conséquence une distribution non équitable de ces marchandises sur les services improvisés. L'exemple suivant illustre la situation.

Soit un service (i,j) de capacité = 120 et $\overline{(i,j)}$ le service improvisé correspondant. Deux marchés sont considérés : AB = 100 et CD = 50. L'optimisation fournie par NETPLAN indique que le service (i,j) recueille 120 et le service improvisé $\overline{(i,j)}$ recueille 30, mais l'analyse détaillée des itinéraires indique que 5% seulement des marchandises du marché AB sont déviées sur le service improvisé alors que pour le marché CD, c'est 50% des marchandises qui sont déviées sur le service improvisé.



$A(i,j)B = 95$ $\quad A\overline{(i,j)}B = 5$

$C(i,j)D = 25$ $\quad C\overline{(i,j)}D = 25$

Cette situation est due au fait que, au cours des itérations successives, l'algorithme a chaque fois considéré d'abord le marché AB avant le marché CD. Un traitement équitable des deux marchés devrait dévier 1/5 des flux de chacun d'eux sur le service improvisé :

$A(i,j)B = 80$ $\quad A\overline{(i,j)}B = 20$ $\quad$ 20% du marché AB sur $\overline{(i,j)}$

$C(i,j)D = 40$ $\quad C\overline{(i,j)}D = 10$ $\quad$ 20% du marché CD sur $\overline{(i,j)}$.

Le problème a été résolu en ajoutant au programme NETPLAN une procédure itérative qui, après optimisation, réalise l'opération illustrée dans l'exemple ci-dessus, c'est-à-dire qui redistribue équitablement les flux de marchandises de façon à ce que les proportions de marchandises déviées sur chaque service improvisé soient les mêmes pour tous les itinéraires empruntant le service planifié correspondant.

6.5.3 Services improvisés quand le routing est exogène

Lorsque NETPLAN est utilisé comme simple système de simulation/comptabilisation, le routing des marchandises est fixé par le participant concerné : dans ce cas, l'identification des services saturés est "immédiate", et il suffit d'associer à chacun d'eux un service improvisé auquel on assigne le volume excédentaire. On applique ensuite une procédure de redistribution des flux similaire à celle présentée dans la section précédente.

6.5.4 Résumé et retards correspondant aux services improvisés

Quand NETPLAN est utilisé pour déterminer un Etat globalement optimal ou un Etat sous-optimal de degré 1, il n'y a pas de problèmes de dépassement de capacité car la configuration S du réseau de services, leurs fréquences F(S) et le routing R des marchandises sont endogènes.

Quand NETPLAN est utilisé pour déterminer un Etat sous-optimal de degré 2 (seul le routing des marchandises est endogène), des services fictifs dont les attributs sont judicieusement calibrés sont ajoutés à tous les services planifiés, cela avant optimisation, et ces services sont traités comme des "services planifiés". Après optimisation, les flux sont ensuite redistribués à l'aide de la procédure décrite plus haut de façon à assurer un traitement uniforme de tous les marchés, et les services fictifs qui sont utilisés sont interprétés comme des services improvisés par la compagnie. Le recours à ces services fictifs constitue également un moyen efficace pour réduire les temps d'exécution parfois trop longs du programme informatique quand des dépassements de capacité surviennent : ces services fictifs (de capacité infinie) évitent à l'algorithme de s'embarquer dans une trop longue exploration des itinéraires possibles.

Quand NETPLAN est utilisé comme simple système de simulation/comptabilisation, les éventuels dépassements de capacité sont simplement éliminés a posteriori grâce à l'introduction de services improvisés parallèles à tous les services planifiés qui s'avèrent saturés : les marchandises excédentaires sont simplement déviées sur les services improvisés correspondants aux services saturés, et on applique une procédure de redistribution des flux similaire à celle utilisée quand le routing est endogène.

Dans tous les cas où des services fictifs sont empruntés par des marchandises (i.e. que NETPLAN soit utilisé comme simple système de simulation/comptabilisation ou pour déterminer un Etat sous-optimal de degré 2), ces services fictifs sont présentés à l'usager sous la forme de **services additionnels improvisés** dont les temps sont supérieurs à ceux de ces services planifiés (par exemple supérieurs de 24 heures), cela de façon à rendre compte des retards correspondants subis par les marchandises. Bien sûr, ces services improvisés (au même titre que les services planifiés) peuvent donner lieu à la location forcée de véhicules additionnels.

6.6 LE MODULE DE RÉPARTITION DE LA DEMANDE ET LA NOTION DE FIABILITÉ

Dans la section 6.3.2, nous avons indiqué que, pour les simulations impliquant plusieurs compagnies en concurrence les unes avec les autres (combinaisons D2-S3-N1 et D2-S3-N2), la première étape fait intervenir un **Module de Répartition de la Demande** qui est utilisé pour déterminer sur chaque marché la part obtenue par chacune des compagnies offrant des services sur ce marché, et donc le volume de marchandises qu'elle va y transporter. Ce Module est basé sur deux modèles mathématiques qui sont présentés ci-dessous, avec ensuite quelques mots sur la procédure requise pour tenir compte des limites fixées par les participants concernés sur les volumes transportés.

6.6.1 Le modèle de répartition

Pour chaque marché m (paires de villes origine-destination), nous définissons **l'attractivité** ou **l'utilité** de chaque compagnie i qui y offre ses services par la relation :

$$U_i^m = K_i \left(P_i^m\right)^{a_1} \left(H_i^m\right)^{a_2} \left(F_i^m\right)^{a_3} \left(M_i^m\right)^{a_4} \qquad (1)$$

où P_i^m = tarif de la compagnie i sur le marché m;

H_i^m = norme de service annoncée par la compagnie i sur le marché m;

F_i^m = fiabilité relative cumulée de la compagnie i sur le marché m (voir section 6.6.2);

M_i^m = niveau de marketing de la compagnie i sur le marché m; on choisira $M_i^m=1$ en l'absence de marketing et, par exemple, M_i^m = 2,3 et 4 pour trois niveaux croissants de marketing;

K_i = constante à calibrer pour la compagnie i; cette constante résume tous les facteurs d'attractivité autres que les tarifs, les normes de service et les fiabilités. Pour simplifier, en supposant toutes les compagnies "identiques", nous posons $K_i=1$;

a_1, a_2, a_3 et a_4 sont des paramètres à calibrer qui représentent les élasticités des utilités U_i^m relativement aux tarifs, aux normes de service, aux fiabilités et aux niveaux de marketing; on a $a_1, a_2 < 0$ et $a_2, a_3 > 0$.

Si D^m représente la demande totale (i.e. le volume de marchandises) sur le marché m, la demande D_i^m attirée par chaque compagnie i offrant ses services sur ce marché est déterminée par la relation suivante :

$$D_i^m = [U_i^m / (\sum_i U_i^m)] \, D^m \qquad (2)$$

où le rapport des utilités définit la part de marché attirée par la compagnie i.

6.6.2 Le modèle de fiabilité

Pour définir la fiabilité relative cumulée F_i^m qui apparaît dans la relation (1), il convient d'abord de préciser les notions de normes de service et de taux de fiabilité dont nous avons déjà parlé dans les sections précédentes. Dans ce qui suit, pour simplifier les notations, l'indice i est éliminé.

La **norme de service** H^m annoncée par une compagnie sur un marché m est le temps de service qu'elle garantit pour la livraison des marchandises sur ce marché.

Cette norme est toutefois toute théorique. En fait, le temps de livraison des marchandises sur un marché donné varie selon l'itinéraire k sur lequel les marchandises sont acheminées, et sur chaque itinéraire, le temps de service T_k^m est une variable aléatoire qui est fonction des délais et problèmes de congestion rencontrés par les véhicules et les marchandises sur le réseau et aux terminus : sur une période de temps plus ou moins longue (une journée, une semaine, un mois, ...), le temps de service T_k^m peut varier considérablement d'une fois à l'autre même si en moyenne il est acceptable; de nombreux clients risquent donc d'être insatisfaits et s'en remettre à d'autres compagnies.

En d'autres mots, la notion de normes de service n'a vraiment de signification que si elle est associée à la notion de **variabilité** des temps T_k^m, c'est-à-dire à leur distribution statistique : c'est seulement un pourcentage α_k^m des marchandises transportées sur l'itinéraire k du

marché m qui parviennent à destination dans un temps T_k^m inférieur ou égal à la norme annoncée H^m.

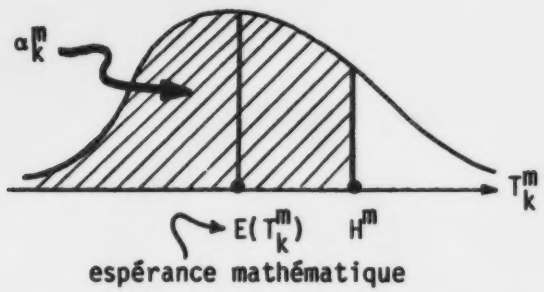
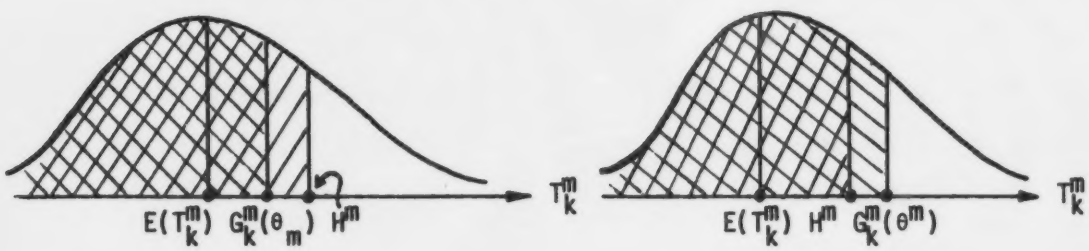


Figure 4. Distribution statistique des temps de service

Ce pourcentage α_k^m constitue le **taux de fiabilité obtenu ou réalisé** sur l'itinéraire k du marché m.

Evidemment, les entreprises de camionnage, de même que leurs clients, sont très conscientes de la variabilité des temps de livraison. C'est pourquoi, les temps de service promis, i.e. les normes H^m, sont souvent accomagnées d'une estimation du pourcentage de fois où la compagnie garantit le respect des normes annoncées. Ce **taux de fiabilité théorique ou promis** représente le pourcentage de marchandises qui **devrait** respecter la norme annoncée sur chaque marché. Par exemple, la compagnie promettra un service de 48 heures, 90% du temps, sur le marché m.



-(a)- -(b)-

Figure 5. Le taux de fiabilité théorique

Dans les figures 5(a) et 5(b) ci-dessus, la surface hachurée jusqu'à H^m représente le taux de fiabilité obtenu α_k^m, c'est-à-dire le pourcentage de marchandises qui respectent la norme H^m. La surface hachurée dans l'autre direction représente le taux de fiabilité promis θ^m qui, par définition, est le pourcentage de marchandises qui devrait respecter la norme H^m. La valeur $G_k^m(\theta^m)$ est le temps respecté par le pourcentage θ^m des marchandises.[1]

La figure 5(a) où $G_k^m(\theta^m) < H^m$ correspond à un itinéraire fiable : le taux de fiabilité obtenu α_k^m est supérieur au taux de fiabilité promis θ^m. Le pourcentage de marchandises qui respectent la norme H^m est supérieur au pourcentage promis. Par contre, la figure 4(b) où $G_k^m(\theta^m) > H^m$ correspond à un itinéraire beaucoup moins fiable puisque le pourcentage de fois α_k^m où les marchandises respectent la norme est inférieur au pourcentage promis.

Remarque : Le coût PH qui apparaît dans la fonction objectif du modèle NETPLAN pour pénaliser les dépassements des normes de service (section 6.4.1) est en fait calculé en fonction des écarts entre la norme H^m et la valeur $G_k^m(\theta^m)$. Pour l'itinéraire représenté par la figure 5(a), le coût de pénalité est nul; il est positif pour l'itinéraire représenté par figure 5(b). Pour plus de détail sur ces pénalités et les autres notions ci-dessus, voir la référence [8].

La conclusion principale de ce qui précède, c'est que la fiabilité d'un itinéraire k sur un marché m est définie d'abord par le taux de fiabilité obtenu α_k^m — qui en fait devrait être noté $\alpha_k^m(H^m)$ puisqu'il dépend la norme H^m —, mais qu'elle doit aussi être qualifiée **relativement** au taux de fiabilité promis ou requis θ^m (qui détermine la valeur de $G_k^m(\theta^m)$) : quand, par exemple, $\alpha_k^m(H^m) = 70\%$, l'itinéraire k peut être considéré comme

---

[1]. Plus précisément, on a $G_k^m(\theta^m) = E(T_k^m) + n.\sigma(T^m{}_k)$ où E et σ sont la moyenne et la variance de T_k^m, et n est un nombre positif fonction de θ^m.

peu fiable si on a promis que 80% des marchandises respecteraient la norme promise (θ^m= 80%), mais au contraire fiable si on a promis que seulement 60% des marchandises respecteraient la norme (θ^m = 60%).

En conséquence, nous définissons **le taux de fiabilité relatif β_k^m de l'itinéraire k sur le marché m** – pour la norme de service H^m et le taux de fiabilité requis θ^m – par la relation :

$$\beta_k^m = \alpha_k^m(H^m)/\theta^m \qquad (3)$$

Dès lors, en considérant à présent tous les itinéraires k sur le marché m (et en réintroduisant l'indice i qui identifie chaque compagnie), nous pouvons définir le **taux de fiabilité relatif β_i^m de la compagnie i sur le marché m** – pour la norme H^m et le taux de fiabilité requis θ^m – par la relation suivante :

$$\beta_i^m = \sum_k \beta_{i,k}^m \cdot \frac{R_{i,k}^m}{D^m} = \frac{\sum_k \alpha_{i,k}^m(H^m)\, R_{i,k}^m}{\theta^m D^m} \qquad (4)$$

où $R_{i,k}^m$ est le flux de marchandises transporté via l'itinéraire k de la compagnie i sur le marché m.

La relation (4) définit la moyenne pondérée des taux de fiabilité relatifs des différents itinéraires concernés, cette pondération étant réalisée à l'aide des parts du volume total D^m transportées sur ces itinéraires. **On peut noter que ce taux β_i^m représente en fait le rapport entre, au numérateur, le volume total de marchandises qui respectent la norme H^m et, au dénominateur, le volume total de marchandises qui devraient respecter la norme H^m.**

Trois commentaires importants s'imposent à l'égard de la relation (4). Les deux premiers concernent l'interprétation subjective par les clients des taux de fiabilité β_i^m, c'est-à-dire les fiabilités réelles qu'ils attribuent à différentes valeurs de β_i^m et sur la base desquelles ils

ajustent leurs comportements; le premier de nos commentaires considère le cas où le numérateur de (4) est supérieur au dénominateur : $\beta_i^m > 1$; le deuxième considère le cas inverse : $\beta_i^m < 1$. Le troisième commentaire a trait à l'évolution dans le temps de β_i^m.

Quand $\beta_i^m > 1$, cela signifie que la compagnie offre un niveau de service supérieur à ce qui est en fait exigé (promis). A toute fin pratique, la compagnie ne retire aucun avantage tangible d'une telle situation : dès que $\beta_i^m > 1$, la compagnie remplit ses contrats; les valeurs $\beta_i^m > 1$ ne lui donnent aucun gain de fiabilité réelle auprès des clients.

Quand β_i^m descend en dessous de 1, la diminution de fiabilité réelle telle que perçue par les clients est vraisemblablement moins importante que la diminution proprement dite de β_i^m, pour autant bien sûr que cette diminution de β_i^m ne soit pas trop grande; en d'autres mots, dans le voisinage de $\beta_i^m = 1$, il y a une certaine inertie de la fiabilité réelle, psychologique; avant de mettre fin à des contrats, les clients continueront à faire comme si $\beta_i^m = 1$ même si β_i^m est un peu en dessous de 1. Par contre, dès que β_i^m descend de façon significative en dessous de 1, la chute de fiabilité réellement perçue peut être beaucoup plus rapide, et même plus importante que la diminution proprement dite de β_i^m : l'effet marginal sur le comportement des clients augmente rapidement pour ensuite diminuer quand β_i^m devient vraiment petit, c'est-à-dire quand la compagnie a de toute façon perdu la confiance de sa clientèle.

Ces deux premiers commentaires nous amènent à substituer à β_i^m une **mesure de fiabilité relative** f_i^m plus représentative des comportements réels des clients; elle est définie par la relation (5) et illustrée par la figure 6.

$$\left.\begin{aligned} f_i^m = \Psi(\beta_i^m) = \Psi\left(\frac{\sum_k \alpha_{i,k}^m (H^m)\, R_{i,k}^m}{\theta^m D^m}\right) \quad & \text{si } \beta_i^m < 1 \\ = 1 \quad & \text{si } \beta_i^m > 1 \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

La fonction Ψ qui correspond à la courbe en S n'a pas encore été définie mathématiquement, mais cela ne présente aucune difficulté.

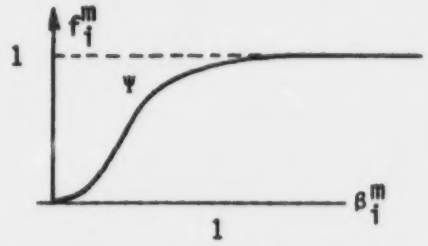


Figure 6. Mesure de fiabilité relative

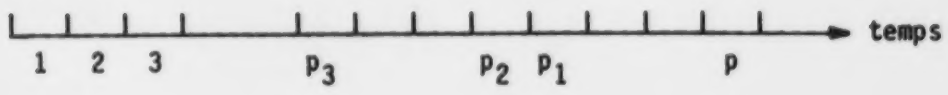
Notre troisième commentaire concerne l'évolution dans le temps des β_i^m, et donc des f_i^m. En particulier, dans notre simulateur SIMTRUCK, les valeurs des f_i^m vont varier d'une période à l'autre, et à chaque période les clients de la compagnie considérée vont ajuster leur opinion sur sa fiabilité dans chaque marché pour décider (compte tenu des autres facteurs en jeu) s'ils continuent ou non à recourir à ses services. Ce serait toutefois une erreur de considérer que, au début d'une période donnée, les clients vont baser leur jugement concernant la fiabilité de la compagnie dans chaque marché seulement sur les résultats de la dernière période pendant laquelle la compagnie a desservi ce marché : les clients ont une mémoire et vont baser leur jugement sur plusieurs périodes antérieures.[1]

Soit p la période de simulation au début de laquelle on se trouve. Soit p_1, p_2, p_3 les trois **dernières** périodes pendant lesquelles la compagnie i considérée a desservi le marché m, p_1 étant la plus récente, p_3 la plus ancienne et p_2 entre les deux.[2]

---

[1]. En fait, le jugement relatif à un marché dépend sans doute aussi des résultats antérieurs dans les autres marchés. Pour simplifier, nous ne tenons pas compte de ces interdépendances.

[2]. Les périodes p_1, p_2, p_3 en question ne sont pas nécessairement les périodes p-1, p-2, p-3 car la compagnie n'a pas nécessairement desservi le marché considéré à chaque période.



En supposant que ce sont ces trois périodes qui comptent vraiment dans le jugement des clients, avec toutefois des poids différents Π_1, Π_2, Π_3, nous définissons ainsi, pour conclure, la **fiabilité relative cumulée** de la compagnie i sur le marché m au début de la période p – pour la norme H^m et le taux de fiabilité théorique θ^m – par la relation suivante :

$$F_i^{m,p} = \Pi_1 f_i^{m,p_1} + \Pi_2 f_i^{m,p_2} + \Pi_3 f_i^{m,p_3} \qquad (6)$$

où f_i^{m,p_1}, f_i^{m,p_2} et f_i^{m,p_2} sont les mesures de fiabilité relative définies par la relation (5) à la fin des périodes p_1, p_2 et p_3, avec

a) $1 > \Pi_1 > \Pi_2 > \Pi_3 > 0$ et $\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 = 1$
quand la compagnie a desservi le marché m pendant au moins trois périodes de simulation antérieures,

b) $1 > \Pi_1 > \Pi_2 > 0$, $\Pi_3 = 0$ et $\Pi_1 + \Pi_2 = 1$,
quand la compagnie a desservi le marché m pendant seulement deux périodes antérieures.

c) $\Pi_1 = 1$, $\Pi_2 = \Pi_3 = 0$
quand la compagnie a desservi le marché m pendant seulement une période de simulation antérieure,

d) $\Pi_1 = \Pi_2 = \Pi_3 = 0$
quand la compagnie n'a pas desservi le marché m dans aucune période de simulation antérieure ainsi qu'au tout début d'une séance de simulation (p=1), auquel cas on prend $F_i^{m,p} = 1$, ce qui suppose une totale confiance des clients du marché m à l'égard de cette compagnie. On pourrait prendre aussi $F_i^{m,p} = 0,80$ par exemple pour témoigner de la prudence des clients.

La relation (6) ci-dessus définit le facteur de fiabilité qui apparaît dans la relation (1) de la section 6.6.1, à la seule différence que l'indice p désignant la période de simulation n'y était pas spécifié.

Remarque : Les différentes mesures de fiabilité α_k^m, β_k^m, β_i^m, ... présentées dans cette section pourront être communiquées aux participants concernés pour leur permettre d'analyser en détail les résultats. Elles seront également communiquées dans le cadre des simulations relatives aux combinaisons D1-S1-N et D1-S2-N (une seule compagnie en jeu).

6.6.3 Prise en compte des limites sur les volumes transportés

Les relations (1) et (2), avec (6), définissent notre modèle de répartition de la demande de transport, mais à une condition près, à savoir qu'on fasse abstraction des limites que les participants fixent éventuellement sur les volumes de marchandises qu'ils acceptent de transporter sur chaque marché. Dans la section 6.1.2 en effet, nous avons indiqué que l'une des Variables de Décision accessibles aux participants leur permet de spécifier quel volume maximum de marchandises est accepté par leur compagnie sur chaque marché. Sans spécifier ce maximum, la compagnie risque d'attirer une part de marché et donc un volume de marchandises plus grand que ce qu'elle souhaite en fait transporter[1], ce qui peut d'ailleurs la pénaliser lourdement sous la forme de services automatiquement improvisés, avec éventuellement une location forcée de véhicules additionnels.

Pour tenir compte des volumes maximums V_i^m spécifiés par chacune des compagnies i sur les différents marchés m où elle offre ses services, l'application du modèle (1), (2) va être réalisée par itérations successives. A chaque itération, pour chaque marché m, la somme des demandes éventuellement excédentaires $\Delta^m = \sum_i (D_i^m - V_i^m)$ avec $D_i^m > V_i^m$ est calculée, et à

---

[1]. En particulier, si une compagnie est seule sur un marché, c'est toute la demande sur ce marché qu'elle va devoir transporter si elle ne spécifie pas le volume maximum qu'elle accepte.

l'itération suivante cette somme excédentaire est redistribuée en considérant seulement les companies pour lesquelles le volume maximum V_i^m correspondant n'a pas été atteint; on rend compte ainsi du fait que, si certaines compagnies refusent des demandes, les expéditeurs s'en remettent aux autres compagnies qui les acceptent. S'il reste un excédent quand on a atteint tous les maximums V_i^m pour toutes les compagnies desservant le marché considéré, cet excédent sera considéré comme "perdu" (c'est-à-dire transporté par d'autres modes de transport, ou d'autres compagnies de camionnage non présentes dans le jeu).

6.7 BANQUE DE DONNÉES ET INTERFACES AVEC L'USAGER ET AVEC NETPLAN

Dans ce qui suit, nous présentons sommairement les résultats des travaux de nature informatique relatifs aux trois paliers de SIMTRUCK qui se situent entre l'usager d'une part et le Programme de Simulation et le Système des Aides à la Décision et à l'Evaluation d'autre part, cela pour les 6 combinaisons D-S-N considérées depuis le début du chapitre 6. Ces trois paliers, schématisés dans la figure 7, sont respectivement :

- l'Interface entre l'usager et le logiciel SIMTRUCK, et plus précisément entre l'usager et la Banque de Données;
- la Banque de Données proprement dite;
- le Programme de Lecture et d'Ecriture qui constitue l'interface entre la Banque de Données et NETPLAN. (Par rapport à ce qui a été présenté dans les pages précédentes, seul ce troisième palier constitue une "nouveauté"; son rôle sera précisé dans ce qui suit.)

6.7.1 Interface Usager-Logiciel

L'Interface entre l'usager (participant ou maître de jeu) et SIMTRUCK regroupe le Programme Maître et le Programme Interactif d'Entrée-Sortie qui ont été définis dans la section 5.6. Le premier programme est accessible au maître de jeu seulement; le second est accessible à la fois au maître de jeu et au(x) participant(s) présent(s) pour la consultation/modification à

à l'écran du micro-ordinateur des données[1] de la Banque de Données.

Cette Interface détermine "l'environnement de travail" de l'usager en donnant accès à différents **menus** ainsi qu'à diverses **commandes** (opérations) et à des **fenêtres** incluant des listes d'informations que l'usager peut faire "dérouler" à l'écran. Des **représentations graphiques du réseau de transport et de certaines de ses composantes seront également** accessibles à l'usager.

Les **menus** définissent les catégories d'actions que l'usager peut effectuer au cours d'une simulation, le choix d'une action spécifique pouvant donner accès lui-même à d'autres menus s'il y a lieu. Par exemple, dans le cas du maître de jeu, on verra apparaître le menu suivant :

1. initialisation d'une nouvelle simulation
2. consultation des résultats d'une simulation
3. modification des données
4. démarrage d'une période de simulation

et le choix 1 donnera ensuite accès au menu suivant relatif aux choix des Domaines de jeu possibles :

1. planification tactique
2. planification stratégique et tactique.

De même, dans le cas d'un participant, le menu principal suivant :

1. consultation des résultats de la période précédente
2. entrée des décisions
3. fin des décisions

fera ensuite apparaître le menu suivant si l'option 1 est choisie :

1. consultation générale des résultats sur les marchés, les services et les dépôts

---

[1]. Le terme "données" est utilisé ici de façon générale; il inclut, entre autres, les valeurs des variables de décision et des variables de simulation telles que définies dans la section 6.1.

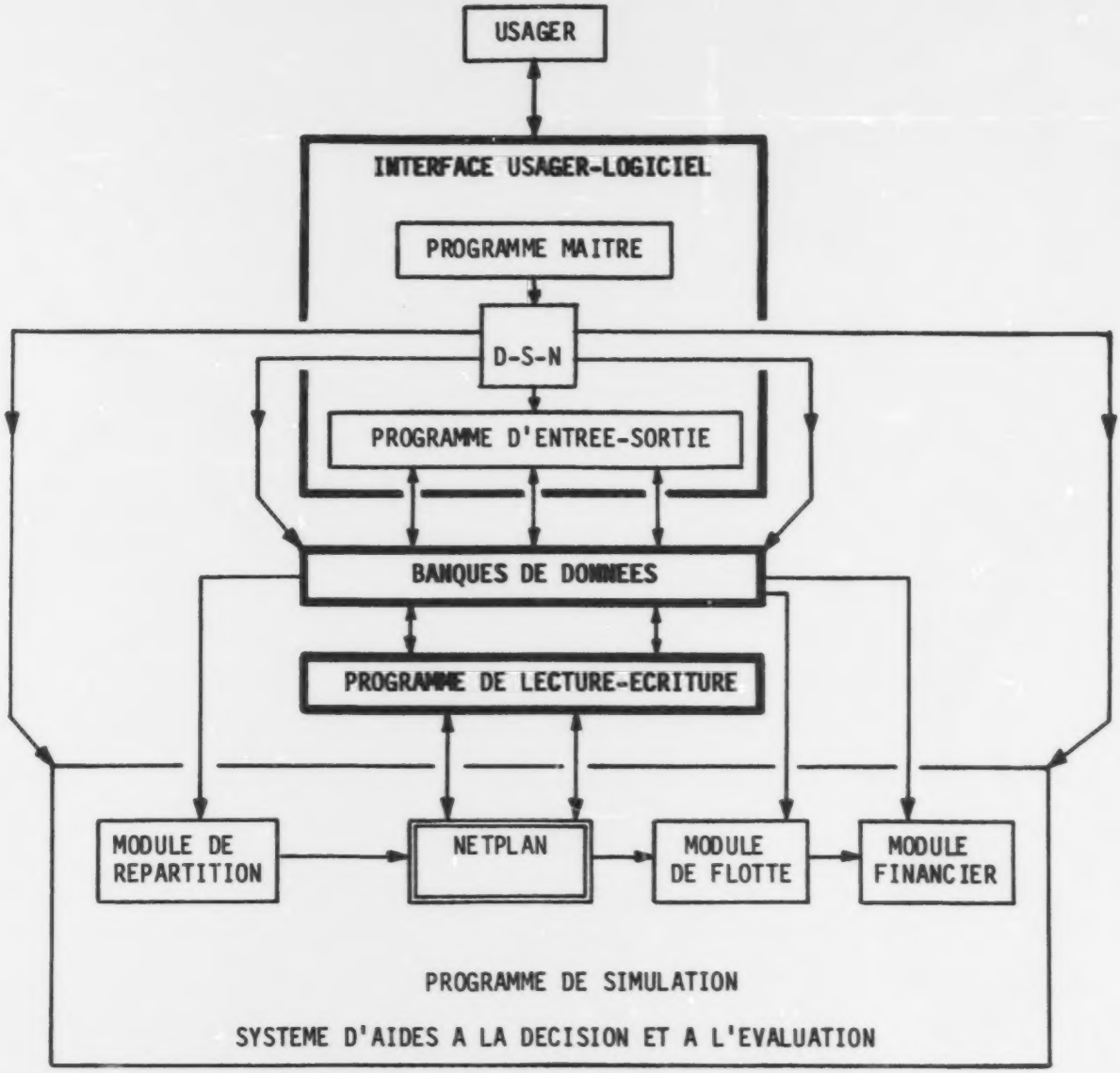


Figure 7. Interfaces Usager/Banque de Données/NETPLAN

2. consultation détaillée des résultats sur :
   2.1 les marchés
   2.2 les services
   2.3 les terminus
3. consultation des performances globales
4. etc.

Lors de la consultation des résultats d'une simulation, ou encore lors de l'entrée/consultation des décisions, les informations seront présentées à l'usager sous la forme de listes à l'intérieur de **fenêtres**, plusieurs de ces fenêtres pouvant apparaître simultanément à l'écran. Par exemple, sur une même "page d'écran", l'usager verra apparaître une fenêtre pour la liste des informations sur les dépôts, une fenêtre pour la liste des informations sur les marchés et leurs itinéraires, et une fenêtre pour la liste des informations sur les services. De cette façon, l'usager va pouvoir passer d'une fenêtre (liste) à une autre selon les consultations/opérations qu'il désire accomplir, tout en gardant à l'écran les informations des autres fenêtres (la fenêtre "sélectionnée" s'active, alors que les autres deviennent "neutres", i.e. non illuminées).

Les opérations possibles sont quant à elles proposées à l'usager sur une bande de l'écran, dite de **"bandes de commandes"**, où l'on trouve par exemple les commantes suivantes :

- modifier (ex. un service, un dépôt, ...)
- éliminer (ex. un itinéraire, ...)
- ajouter (ex. un service, ...)
- quitter (la page d'écran)
- etc.

Par ailleurs, tel qu'expliqué dans la section 6.2, des **tests interactifs de validité et de cohérence** seront réalisés sur les décisions

prises par l'usager. Par exemple, l'ajout d'un service sera immédiatement suivi d'un test vérifiant l'existence de terminus à l'origine et à la destination de ce nouveau service. Chaque incohérence ou invalidité sera ainsi directement signalée à l'usager, lequel pourra alors soit prendre une ou plusieurs autres décisions pour corriger la situation, soit éliminer la décision qu'il a prise.

L'élimination des incohérences et invalidités n'est toutefois pas immédiatement obligatoire au moment de leur détection : l'usager pourra continuer à prendre d'autres décisions comme si de rien n'était. Toutefois, lorsque le démarrage de la simulation sera "activé", une validation globale sera réalisée de façon à détecter les incohérences et invalidités qui subsistent : si c'est le cas, la simulation n'est pas réalisée, les inconsistances sont signalées à l'usager et un menu des actions possibles à prendre lui est alors présenté. La simulation n'est jamais possible tant que toutes les incohérences et invalidités ne sont pas éliminées.

Précisions enfin que la sélection d'une action dans un menu, d'une fenêtre ou encore d'une commande pourra se faire soit à l'aide du clavier (des clés sont réservées à cette fin), soit à l'aide d'une "souris".

6.7.2 Structure de la Banque de Données

Pour permettre, via le Programme Interactif d'Entrée-Sortie, une consultation/modification rapide et facile de la Banque de Données, avec la possibilité de passer aisément d'une liste (fenêtre) de données à une autre, cette Banque a été construite sur la base d'une structure interne conçue de façon modulaire et définie par un ensemble de "liens" logiques unissant les différents modules les uns aux autres. Cette structure est celle qui est "chargée" dans l'espace mémoire centrale pour le Programme d'Entrée-Sortie.

Nous présentons ci-dessous cette structure en nous limitant, pour simplifier, mais aussi parce que c'est la partie la plus complexe, à la partie de la Banque de Données nécessaire à NETPLAN.

Cinq **modules** ou **fichiers** sont définis :

- le fichier des données relatives aux marchés,
- le fichier des données relatives aux terminus,
- le fichier des données relatives aux services,
- le fichier des données relatives aux itinéraires (routes) sur chaque marché,
- le fichier des données sur les éléments d'itinéraires, qui constitue une table de correspondance entre les itinéraires et les services.

Chaque fichier est constitué d'une série d'**enregistrements**, chacun d'eux correspondant à une "composante" du système de transport : un marché, un terminus, un service, un itinéraire, ou un élément d'itinéraire. Chaque enregistrement est constitué d'une liste d'**attributs** et/ou de **liens** caractérisant la composante correspondante du système de transport. La figure 8 résume le contenu de ces enregistrements, et les figures 9, 10, 11 schématisent les liens entre les différents enregistrements.

Chaque fichier est de type "binaire", ce qui donne la possibilité d'accéder directement à n'importe quel attribut ou lien d'une composante (enregistrement) appartenant à un fichier particulier.

Le **fichier des marchés** contient tous les marchés identifiés lors de l'initialisation de la simulation.

Le **fichier des terminus** contient tous les noeuds du réseau; un terminus existe (est ouvert) en un noeud si la variable définissant sa taille à une valeur positive. Les terminus sont classés dans ce fichier par ordre croissant de leur identification, par exemple en ordre alphabétique.

ENREGISTREMENT D'UN SERVICE

-Numéro du service -Coût par remorque -Distance -Temps de parcours (planifié et improvisé) -Capacité par remorque -Fréquence (planifiée et improvisée) -Volume -Volume excédentaire -Coût total -Délai -Temps de chargement
● terminus origine
● terminus destination
● 1er itinéraire l'utilisant
● 1er service suivant avec la même origine
● 1er service suivant avec la même destination

ENREGISTREMENT D'UN MARCHE

-Numéro du marché -Demande -Norme de service -Taux de fiabilité obtenu
● 1er itinéraire
● terminus origine
● terminus destination

ENREGISTREMENT D'UN ITINERAIRE

-Volume -Temps de service -Coût de classification -Coût de transport
● marché desservi
● 1er élément d'itinéraire
● 1er itinéraire suivant sur le même marché

ENREGISTREMENT D'UN TERMINUS

-Numéro du terminus -Taux de classification -Taille -Taux de chargement -Coût unitaire de manutention -Type de terminus -Taux d'arrivées -Temps de manutention -Coût total de manutention -Nombre de départs -Nombre d'arrivées -Volume manutentionné
● 1er service originant
● 1er service arrivant
● 1er terminus suivant qui existe

ENREGISTREMENT D'UN ELEMENT D'ITINERAIRE (FICHIER DE CORRESPONDANCE)

● Service correspondant
● 1er élément suivant de l'itinéraire
● 1er itinéraire suivant sur le même service

Figure 8 : Description des enregistrements

Les ▨● définissent les liens unissant les enregistrements (voir les figures 9, 10 et 11).

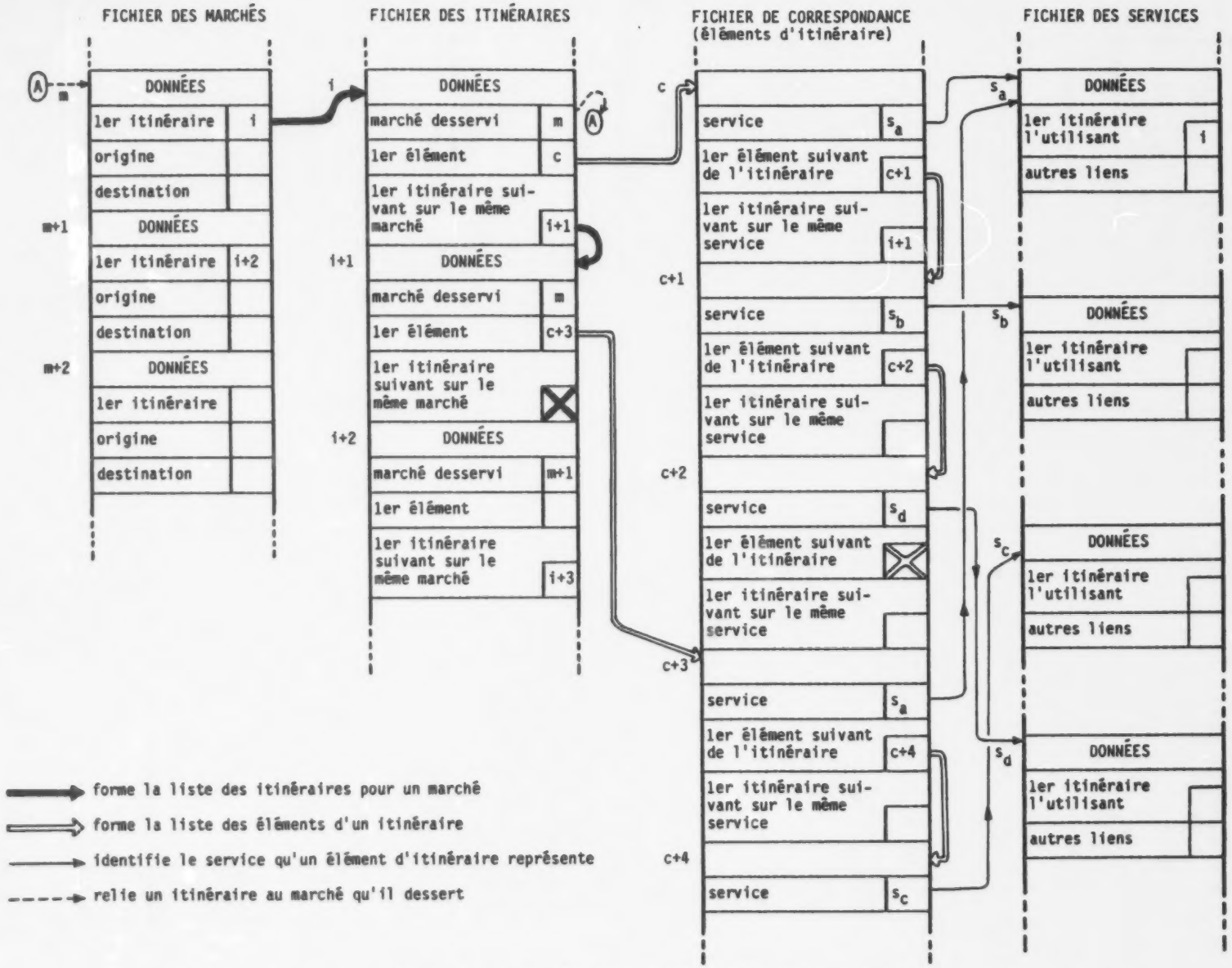


Figure 9. Les marchés, leurs itinéraires et leurs éléments.

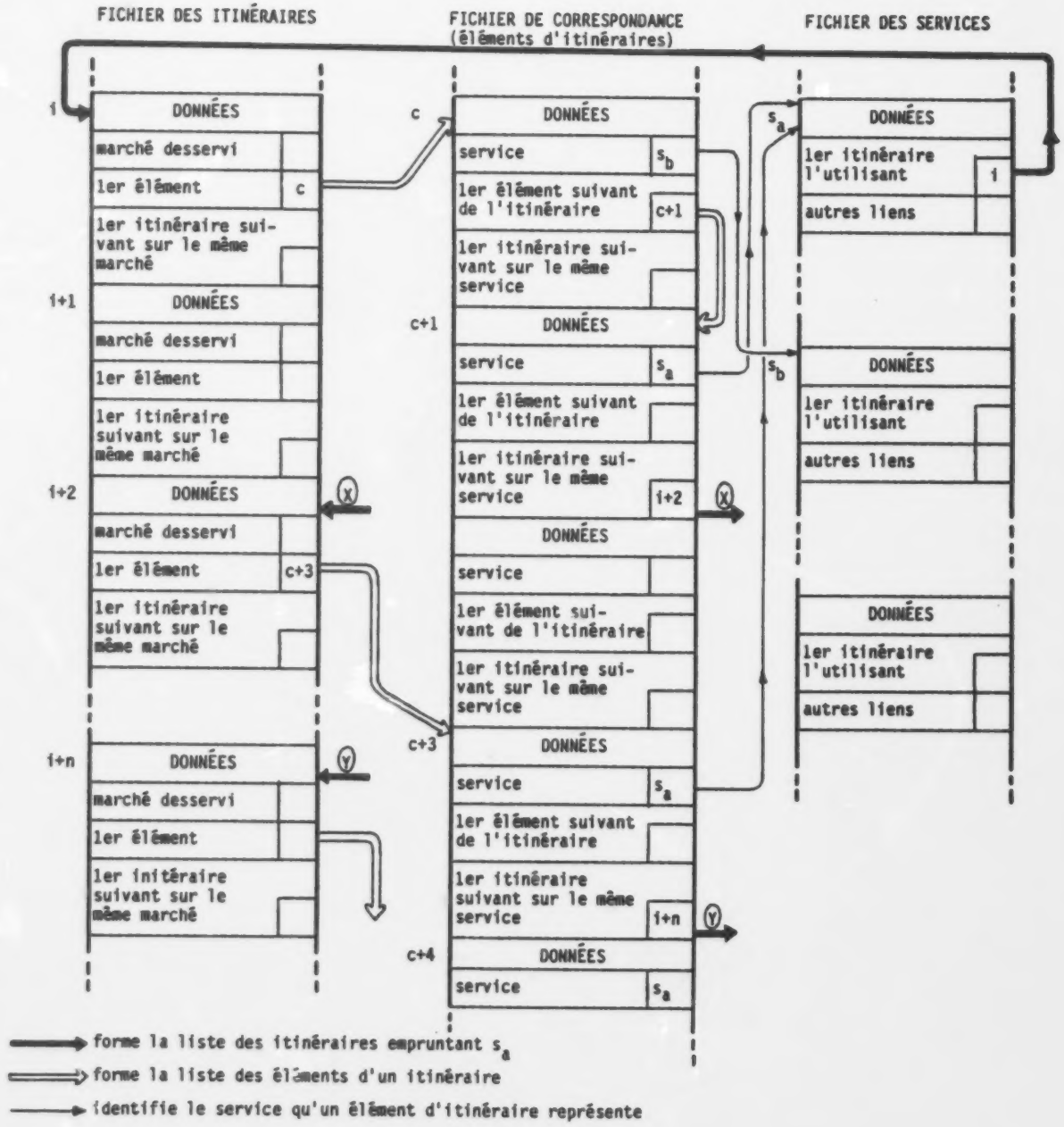


Figure 10. Les services et les itinéraires les empruntant.

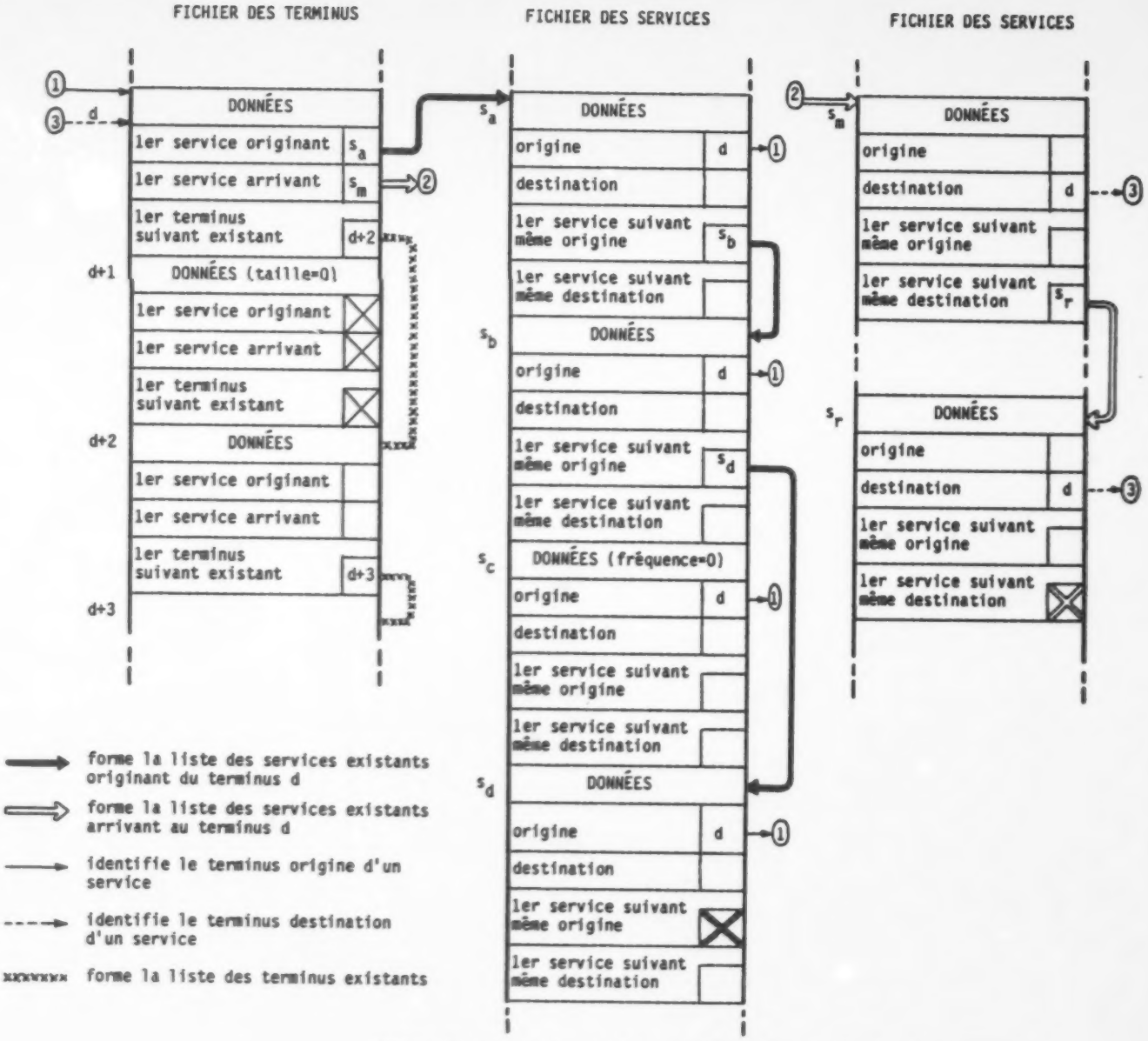


Figure 11. Listes des services de même origine et de même destination.

Le **fichier des services** contient tous les arcs définissant le "réseau total", i.e. le réseau incluant un arc dans chaque direction entre chaque paire de noeuds, qu'il y ait ou non un terminus ouvert en ces noeuds[1]; un service existe sur un arc si la variable fréquence a une valeur positive.

Le **fichier des itinéraires** ne contient que les itinéraires créés par l'usager ou générés par NETPLAN. Il en est de même pour le **fichier de correspondance** entre les itinéraires et les services.

Ce fichier de correspondance est plus exactement une liste d'enregistrements qui correspondent chacun à un **élément d'itinéraire**, c'est-à-dire l'un des services emprunté par un itinéraire donné. Chaque enregistrement de ce fichier est constitué de liens (au sens informatique indiqué plus haut) qui, avec ceux des enregistrements appartenant au fichier des itinéraires et au fichier des services, permettent de retrouver facilement:

- tous les éléments (services) constituant chaque itinéraire (figure 9);
- tous les itinéraires empruntant un service donné (figure 10).

De même, les liens du fichier des marchés et du fichier des itinéraires permettent la construction et un parcours rapide de la liste des marchés et de leurs itinéraires respectifs (figure 9), les liens du fichier des terminus permettent la construction et un parcours rapide de la liste des terminus existants (figure 11), et les liens du fichier des terminus et du fichier des services permettent la construction et un parcours rapide des listes des services classés par origine et par destination (sous-listes des services de même origine et des services de même destination; figure 11).

---

[1]. Ce "réseau total", que l'on peut noter SPT, n'est donc pas nécessairement identique au "réseau complet" SPC défini dans la section 6.4.2; SPC inclut un service, dans chaque direction, entre chaque paire de terminus existant; on a donc SPC $\subseteq$ SPT.

Les notes qui suivent commentent les figures 9, 10 et 11.

Figure 9. - Le marché m est desservi par les itinéraires i et i+1.
- L'itinéraire i est constitué des éléments c, c+1 et c+2 qui correspondent respectivement aux services s_a, s_b et s_d.
- L'itinéraire i+1 est constitué des éléments c+3, c+4, ... qui correspondent respectivement aux services s_a, s_c, ...

Figure 10. - Le service s_a est emprunté par les itinéraires i, i+2 et i+n.
- Il est à noter que pour construire la liste des itinéraires empruntant un service donné, il faut parcourir le fichier de correspondance (fichier des éléments d'itinéraires), et plus précisément la liste des éléments constituant le 1er itinéraire utilisant ce service jusqu'à ce qu'on ait trouvé l'élément correspondant au service considéré pour ainsi passer ensuite à l'itinéraire suivant empruntant le même service, et ainsi de suite. Dans l'exemple, on parcourt l'itinéraire i en commencant par l'élément c (service s_b), puis l'élément c+1 (service s_a), pour ensuite passer à l'itinéraire i+2, etc.

Figure 11. - Les liens du fichier des terminus définissent la liste des terminus existants (..., d, d+2, d+3, ...).
- Les liens du fichier des terminus et du fichier des services permettent de constuire, pour chaque terminus, la liste de tous les services existants ayant ce terminus comme origine. Cette liste est triée par ordre de destination; par exemple, la liste des services d'origine A sera A-B, A-C, A-D, ... Dans la figure, les services existants originant du terminus d sont s_a, s_b et s_d.

- De même, pour chaque terminus, on peut construire la liste de tous les services existants ayant ce terminus comme destination. Cette liste est triée par ordre d'origine; par exemple, la liste des services arrivant en A sera B-A, C-A, D-A, ... Dans la figure, les services arrivant au terminus d sont s_m et s_r.
- En combinant la liste des terminus existants avec d'une part les listes des services existants originant des terminus, et d'autre part avec les listes des serices existants arrivant aux terminus, on obtient respectivement la liste de tous les services triés par origine-destination d'une part (ex : A-B, A-C, A-D; B-A, B-C, ...), et la liste de tous les services triés par destination-origine d'autre part (ex. : B-A, C-A, D-A; A-B, C-B, ...).

6.7.3 Interface Banque de Données - NETPLAN

Lorsque nous avons décidé d'intégrer NETPLAN au développement de notre simulateur SIMTRUCK, nous nous sommes vite rendus compte que l'organisation de sa banque de données n'était pas compatible avec nos objectifs de développement d'une Interface Usager-Logiciel interactive, souple et facile d'utilisation, notamment au niveau de la consultation et de la modification rapide des données en question. En fait, la lecture et l'écriture des données dans la banque, à partir du programme NETPLAN proprement dit, se faisait sans le support d'une véritable structure de banque.

L'Interface Usager-Logiciel et la Banque de Données présenteés dans les deux sections précédentes ont au contraire été structurées dans le cadre des objectifs particuliers du simulateur et des "contraintes" imposées par le programme NETPLAN. Conséquemment, des modifications et des ajouts ont dû être apportés aux anciens programmes de lecture et d'écriture

des données dans la Banque à partir de NETPLAN, cela en fonction de la structure interne conçue pour celle-ci.

D'autres modifications et ajouts ont également été apportés au niveau de la sortie des résultats fournis par NETPLAN (avant écriture dans la Banque de Données) pour identifier et traiter de façon particulière les services fictifs et les itinéraires les empruntant, ainsi que pour assurer la redistribution des flux de marchandises (section 6.5). En fait, le fichier des services n'inclut pas d'enregistrements spécifiques pour les services fictifs : chacun d'eux est traité sous la forme d'attributs dans l'enregistrement du service planifié correspondant, et ce sont ces attributs qui, le cas échéant, sont traduits au niveau des résultats sous la forme de services improvisés.

Enfin, étant donné que NETPLAN n'avait pas été prévu pour être utilisé comme simple système de simulation/comptabilisation (cas où tout est fixé de façon exogène, y compris le routing des marchandises), des procédures ont été ajoutées au programme de lecture de la Banque de Données pour assurer le chargement des itinéraires et des éléments d'itinéraires dans ce contexte.

6.8 TRANSFERT DE NETPLAN SUR MICRO-ORDINATEUR

Pour être complet, soulignons que NETPLAN fut conçu en langage FORTRAN et développé sur un gros ordinateur central (Cyber). SIMTRUCK est quant à lui conçu en langage C (mis à part bien sûr sa composante NETPLAN) sur un IBM-PC AT. Il a donc fallu en tout premier lieu assurer le transfert de NETPLAN sur micro-ordinateur. NETPLAN étant trop gros pour être chargé globalement dans l'espace mémoire centrale d'un tel support informatique, nous avons subdivisé le programme en plusieurs modules de façon à ce que chacun d'eux puisse être chargé individuellement en temps opportun.

Les calculs en nombre réels dans le programme initial étaient par ailleurs réalisés en "simple précision", laquelle n'est pas suffisante sur un micro-ordinateur (du moins, pas pour les calculs effectués par le programme). Des modifications ont donc également été nécessaires à ce point de vue, de même que certaines formulations (au niveau de la grammaire et de la syntaxe) ont dû être révisées parce qu'elles n'étaient pas acceptées par le compilateur du micro-ordinateur.

7. LE CAS DU DISPATCHING

Ce chapitre a trait à la "version dispatching" du simulateur, c'est-à-dire au traitement des simulations relatives aux combinaisons D3-S1-N1 et D3-S1-N2 qui ont été définies précédemment (chap. 5) et qui impliquent un seul participant ou usager (Situation de jeu S1) en charge de la fonction dispatching[1] (Domaine D3) dans un terminal d'une compagnie de camionnage. Le Niveau de complexité N1 suppose que l'usager-dispatcheur a accès à un système d'aide à la décision; le Niveau N2 suppose qu'il n'y a pas accès.

Dans le chapitre 5, nous avons expliqué que le fonctionnement général de SIMTRUCK dans le contexte du dispatching est semblable à celui relatif aux autres combinaisons D-S-N traitées en détail au chapitre 6 (planification stratégique et/ou tactique d'entreprises). En particulier, nous avions indiqué qu'il repose sur la même Structure Informatique, avec quatre composantes principales : un Programme d'Entrée-Sortie, une Banque de Données, un Programme de Simulation et un Système d'Aide à la Décision et à l'Évaluation. Nous avions souligné toutefois que, malgré cette même structure, ce sont évidemment des modules très différents qui interviennent au niveau de ces quatre composantes principales, avec évidemment aussi des différences majeures au niveau de la mise en oeuvre de ces modules par le Programme Maître, également défini au chapitre 5. En d'autres mots, la présentation de SIMTRUCK au chapitre 5 se voulait suffisamment générale pour servir d'introduction et être applicable autant à la "version planification stratégique/tactique" qu'à la "version dispatching". Ces deux "versions", bien qu'intégrées au même simulateur et basées sur une même structure informatique générale, avec le même principe de fonctionnement (décisions → simulation → résultats), sont toutefois fort différentes.

La différence principale, comme on le verra plus en détail dans ce qui suit, a trait au traitement du temps. Dans la "version planification

---

[1]. Le terme "dispatching" nous paraît plus précis que le terme "répartition" qui est souvent utilisé pour désigner bien d'autres choses.

stratégique/tactique", le temps est découpé en périodes identiques (1 an ou 6 mois), et le ou les participants en jeu ont tout le loisir, avant chaque période, d'analyser la situation et de prendre leurs décisions; les conséquences de celles-ci sont simulées en bloc. En d'autres mots, le système est dans ce cas totalement "statique", l'analyse et la prise de décision se faisant quand le temps est arrêté; le caractère dynamique de la simulation ne résulte que de la répétition de périodes succesSsives qui donnent l'impression qu'on avance dans le temps. Dans la "version dispatching" au contraire, on va travailler en **temps réel simulé** : l'évolution du temps passé par l'usager-dispatcheur à l'écran du micro-ordinateur reproduira le temps réel, également par périodes successives, mais sans interruption, et avec des périodes en fait variables et beaucoup plus courtes correspondant à la suite quasi continue des événements faisant évoluer le système. L'analyse et la prise de décision se feront pendant que le système continue à évoluer, reproduisant ainsi le contexte dans lequel travaille un véritable dispatcheur.

Une autre différence importante entre les deux "versions" du simulateur a trait au mode de représentation de l'environnement dans lequel évolue l'usager. Dans cette "version dispatching", on aura en effet recours à des représentations graphiques (et autant que possible interactives-graphiques) de l'offre et de la demande de transport, alors que dans l'autre version cette dimension ne constitue pas un élément majeur du système, du moins tel que conçu jusqu'à présent.

Cette "version dispatching" du simulateur est moins avancée que la version "planification stratégique/tactique". En fait, nous nous sommes limités jusqu'à présent à sa conception générale et à ses principales composantes; de ce point de vue, nos travaux ont progressé de façon significative. Par contre, nous n'avons encore entrepris aucun travail d'implantation informatique; à cet égard toutefois, nous disposons déjà d'une base solide de travail comme on le verra dans la suite de ce texte.

7.1 DESCRIPTION DU PROBLÈME

Le problème traité dans les simulations en question ici est celui d'un dispatcheur disposant d'une flotte donnée de véhicules pour assurer la cueillette et la livraison de marchandises en milieu urbain (et/ou suburbain) à partir d'un terminus donné. Ces deux fonctions, cueillette et livraison, correspondent à des requêtes séparées : d'une part il y a des marchandises à aller chercher en différents endroits de la région considérée pour les ramener au terminus (d'où elles seront ensuite envoyées vers leurs destinations finales), et d'autre part il y a des marchandises se trouvant au terminus (en provenance de différents lieux d'origine) et qui doivent être livrées en différents endroits de la même région urbaine.

Toutes les cueillettes à effectuer sont déterminées par des appels téléphoniques de clients-expéditeurs, mais on suppose que plusieurs de ces appels se sont produits durant la ou les journées précédentes : une partie des requêtes à traiter est donc connue à l'avance, c'est-à-dire avant la séance de travail du dispatcheur considéré. Les opérations de cueillette relatives à ces requêtes peuvent donc être planifiées au moins en partie à l'avance, i.e. au tout début de la séance de travail du dispatcheur, par exemple pendant la première heure ou ½ heure durant laquelle on suppose qu'il n'y a aucun autre appel téléphonique. L'autre partie des ceuillettes à effectuer est par contre inconnue à l'avance : après la première heure ou ½ heure, plusieurs autres appels téléphoniques surviennent qui déterminent d'autre requêtes devant être traitées le jour même. Ces requêtes inconnues d'avance, et qui surviennent de façon inégale dans le temps, peuvent s'avérer bien plus nombreuses dans certains cas que celles connues a priori.

La plupart des livraisons à effectuer sont par contre le plus souvent connues à l'avance. Elles ont été déterminées le ou les jours précédents, voire même durant la nuit précédant la séance de travail du dispatcheur considéré, cela à partir du contenu des camions qui sont arrivés au termi-

nus. À ce niveau aussi, une planification préalable est donc possible durant la première heure ou ½ heure de travail. Il peut toutefois arriver aussi que certaines livraisons ne soient pas connues d'avance : certains camions peuvent arriver au terminus pendant la séance de travail du dispatcheur, avec des marchandises dont une partie doit être livrée le jour même dans la région considérée[1].

La description qui précède correspond à une situation générale plus ou moins théorique mais représentative de plusieurs situations réelles. En pratique, dnas la réalité, plusieurs cas sont possibles : toutes les cueillettes et livraisons peuvent être connues d'avance; toutes les cueillettes (connues ou non d'avance) sont à traiter durant une moitié de la journée, les livraisons étant traitées durant l'autre moitié, etc. De même, plusieurs variantes sont possibles quant à la fréquence d'arrivée des requêtes (cueillettes et/ou livraison) inconnues d'avance : dans certains cas ces requêtes seront plus ou moins distribuées uniformément durant la journée, alors que dans d'autres cas on peut assister à des pointes qui elles-mêmes peuvent se produire plusieurs fois dans la journée ou au contraire se situer à l'intérieur de tranches horaires connues, par exemple tôt le matin ou en fin d'après-midi.

Compte tenu de la diversité des cas possibles, le simulateur est conçu pour pouvoir traiter une situation générale faisant intervenir simultanément des cueillettes et des livraisons, certaines de celles-ci étant connues à l'avance, les autres survenant de façon aléatoire durant certaines tranches de la séance de simulation. Cette situation générale, schématisée par la figure 12, est en fait définie par différents paramètres dont les valeurs sont définies par le maître de jeu[2]. Celui-ci peut ainsi ainsi définir des situations plus particulières, plus spécifiques, en choisissant de façon adhoc les valeurs de certains paramètres. (Par exemple :

---

1. Dans ce cas, plusieurs requêtes surviennent au même moment.
2. Rappelons que le rôle de maître de jeu peut être tenu par la même personne que l'usager-dispatcheur quand celui-ci organise son propre apprentissage.

annuler l'existence de cueillettes et/ou livraisons connues d'avance, ou au contraire empêcher l'arrivée aléatoire de requêtes; étaler de façon uniforme les arrivées aléatoires des requêtes sur toute la durée de la séance de simulation, ou au contraire définir une distribution plus particulière de ces arrivées durant une tranche horaire définie a priori; etc.)

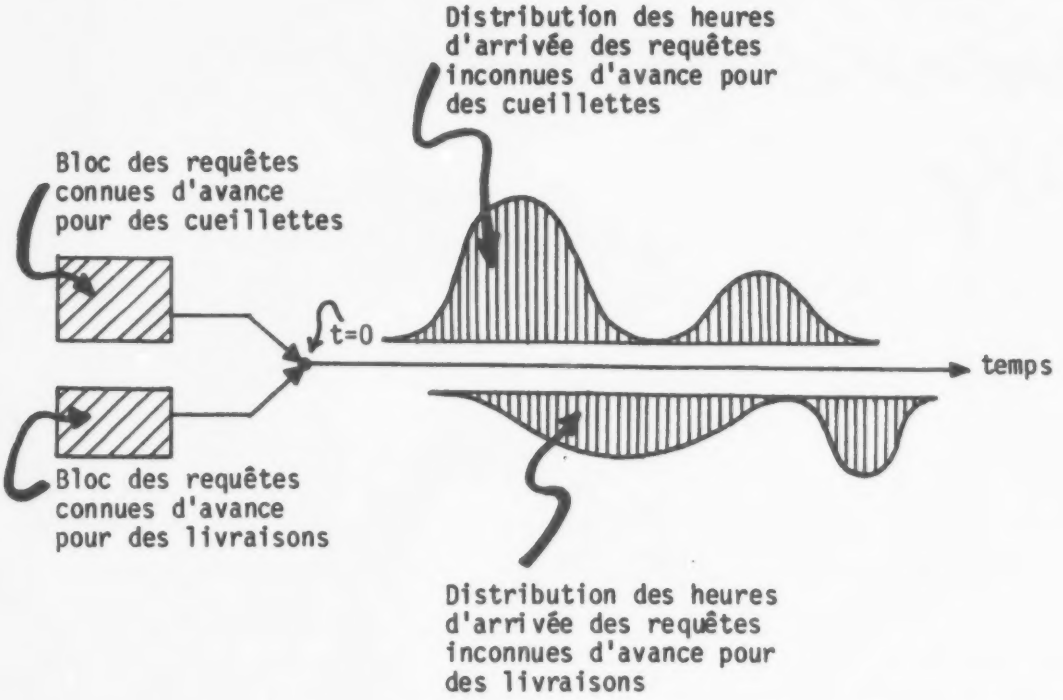


Figure 12. Arrivées des requêtes

L'heure d'arrivée des requêtes n'est que l'une des caractéristiques de celles-ci. D'autres caractéristiques ou attributs doivent être pris en considération. En particulier, le lieu géographique où doit être effectué chaque cueillette ou livraison doit être défini. Si la région est divisée en zones, il peut arriver que la distribution des requêtes soit uniforme sur toute la région (même probabilité pour chaque zone), mais il peut arriver aussi que certaines zones soient caractérisées par des fréquences de requêtes supérieures ou inférieures aux autres. L'heure minimale et l'heure maximale entre lesquelles une cueillette ou livraison doit être

effectuée constituent deux autres attributs de chaque requête. Le volume de marchandises à aller chercher ou à livrer est lui aussi une autre donnée importante. Plusieurs cas sont possibles relativement à ces différents attributs. Par exemple, la fenêtre de temps associée à chaque requête peut être définie a priori par une règle simple (ex. : heure minimale = heure d'arrivée de la requête, et heure maximale = heure minimale + 4 heures), mais plus généralement chaque fenêtre de temps devra être représentée par deux variables aléatoires. De même, du point de vue des volumes de marchandises, on peut considérer dans certains cas que les volumes associés à toutes les requêtes sont quasi identiques, alors que dans d'autres cas ils pourront varier de façon aléatoire. Le simulateur est conçu pour pouvoir traiter différents contextes relativement à ces différents attributs des requêtes.

La région urbaine et le réseau routier où s'effectuent les cueillettes et livraisons constituent évidemment aussi une autre dimension importante du problème de dispatching. Cette région peut être plus ou moins grande, avec un réseau routier plus ou moins dense et des "obstacles" (rivières, zones congestionnées, ...) plus ou moins contraignants entre des zones plus ou moins nombreuses, etc. Dans le cadre d'un simulateur comme SIMTRUCK, on pourrait travailler avec une région et un réseau fictifs définis géographiquement par des paramètres que le maître de jeu pourrait contrôler. Il est possible également d'opter pour une vraie région avec un vrai réseau, quitte à simplifier (agréger) celui-ci pour limiter le nombre de noeuds et d'arcs. Nous n'avons pas encore fait notre choix définitif, mais notre préférence se porte sur la région montréalaise; nous disposons déjà au Centre de recherche sur les transports (C.R.T.) d'une représentation digitalisée de son réseau routier.

Ce sont enfin toutes les données caractérisant les ressources dont dispose l'usager-dispatcheur, ainsi que les stratégies d'opération possibles, qui complètent la définition générale du problème. Ainsi, la taille

de la flotte de véhicules disponibles peut être plus ou moins grande, et ces véhicules peuvent être tous identiques (même capacité) ou au contraire appartenir à deux ou trois catégories distinctes. Quant aux stratégies d'opération possibles, là aussi plusieurs cas peuvent être définis pour représenter différentes situations réelles. Par exemple, on peut interdire à tout véhicule assurant des livraisons (cueillettes) d'effectuer des cueillettes (livraisons). De même, il faut choisir entre la possibilité pour un véhicule assurant une tournée d'être détourné sur une nouvelle requête et la stratégie qui considère indisponible tout véhicule déjà engagé dans une tournée. Le simulateur est conçu pour permettre au maître de jeu la définition de différents contextes, i.e. de différentes flottes de véhicules et de différentes règles (contraintes) quant aux stratégies d'opération possibles de la part de l'usager-dispatcheur.

7.2 PRINCIPE MÉTHODOLOGIQUE : SIMULATION DYNAMIQUE PAR ÉVÉNEMENTS DISCRETS

7.2.1 Les notions d'état et d'événement

Cette section et certaines des suivantes, et plus largement plusieurs aspects de la "version dispatching" de notre simulateur, s'inspirent en partie de la méthodologie utilisée par des collègues du C.R.T. dans le développement d'un modèle de simulation de services ambulanciers (ref. [10]). Bien qu'appliquée dans notre cas à un contexte très différent de celui auxquels font face les dispatcheurs de services d'urgence (notamment du point de vue de la couverture du territoire considéré par les postes d'attente où sont localisées les ambulances[1]), cette méthodologie nous apparaît comme la base de référence la plus pertinente à notre problématique.

Qu'il s'agisse en effet de soins médicaux d'urgence ou des opérations de cueillette/livraison de marchandises qui nous occupent ici, on se trouve confronté à un contexte caractérisé par des requêtes (demandes de service)

---

[1]. Dans notre cas, le terminus est le seul poste d'attente.

qui surviennent de façon discrète et aléatoire dans le temps. Plus généralement, ce sont en fait non seulement les requêtes mais aussi toutes les activités qui en découlent qui peuvent être caractérisées et représentées par des "événements discrets" (envoi d'un véhicule, arrivée sur les lieux d'une requête, etc.).

Bref, le type de simulation qui retient notre attention est celui communément appelé "simulation par événements discrets" (Discrete-Event-Simulation). Ce type de simulation est caractérisé par le fait que l'**état du système modélisé** ne change qu'en une quantité dénombrable de moments où se produisent différents **événements** qui sont déterminés "extérieurement" ou qui sont générés par d'autres événements antérieurs. Plus précisément, dans notre cas, nous faisons la distinction entre :

- Les **événements "extérieurs"** qui, par définition, échappent au contrôle du dispatcheur. Ces événements sont soit générés aléatoirement (ex. : l'arrivée d'une requête non connue d'avance[1], ou la mise d'un véhicule en indisponibilité à cause d'une panne ou d'un accident), soit définis a priori (ex. : l'arrivée des requêtes connues d'avance[2], ou le début d'une pause pour un véhicule).
- Les **événements "conditionnels"** qui découlent de l'arrivée d'événements antérieurs ("extérieurs" ou "conditionnels" eux-mêmes). Ces événements "conditionnels" correspondent à des décisions du dispatcheur (ex. : l'envoi d'un véhicule vers différents lieux de cueillette/livraison, ou le détournement d'un véhicule en tournée sur une autre destination, ...)

---

1. Chaque requête correspond à un événement. Si plusieurs requêtes arrivent au même instant, elles seront traitées comme des événements distincts (par exemple, quand des livraisons sont déterminées par l'arrivée d'un camion au terminus en cours de simulation, ou se trouve en fait confronté à autant de requêtes simultanées).
2. Les requêtes connues d'avance constituent des données qui en fait correspondent à des événements antérieurs à la séance de simulation. Elles seront générées dans une étape de pré-simulation et traitées en bloc sous la forme d'événements distincts survenant à l'instant t = 0; voir figure 9.

ou résultent directement d'événements antérieurs sans impliquer de décisions du dispatcheur (ex. : l'arrivée sur un lieu de cueillette/livraison, ou le départ d'un tel lieu vers un autre, ou le retour en disponibilité au terminus)[1].

Ces événements extérieurs et conditionnels constituent en d'autre mots les circonstances qui font passer le système d'un état à un autre, c'est-à-dire celles qui déterminent l'évolution dans le temps de la demande et de l'offre de transport propres au contexte considéré. Plus précisément, nous appelons **état du système de dispatching** considéré ici celui qui est entièrement défini par :

- **Le statut et la localisation des véhicules.**
  Ces informations indiquent quels véhicules sont au terminus, quels sont ceux en train de se rendre vers des lieux de cueillette ou livraison et de quels lieux il s'agit, quels sont ceux se trouvant déjà en des lieux de cueillette ou livraison et de quels lieux il s'agit, quelles sont les capacités résiduelles des véhicules en service assurant des cueillettes, etc.

- **Le statut des requêtes** (cueillettes/livraisons)
  Ces informations indiquent quelles requêtes ont déjà été traitées, quelles sont celles en train d'être traitées et en voie de l'être (et par quels véhicules) ainsi que celles en file d'attente.

7.2.2 L'horloge et la liste des événements

Pour gérer le déroulement d'une simulation dynamique par événements discrets, il est nécessaire de disposer d'un mécanisme, ou plus exactement d'un ensemble de procédures, qui assure automatiquement la mise à jour de l'état du système. Par ailleurs, étant donné que les changements d'état

---

[1]. Certains événements "conditionnels" peuvent aussi être aléatoires. Par exemple, le départ d'un lieu de cueillette (qui découle de l'événement : arrivée sur le lieu) dépend du temps passé sur place, lequel temps peut être généré de façon aléatoire entre un temps minimum et un temps maximum.

surviennent uniquement lorsque des événements se produisent, il n'est pas requis d'examiner le système entre deux événements successifs : dès qu'un nouvel état a été déterminé suite à un événement particulier (on est alors à l'instant t = temps d'arrivée de l'événement en question), il suffit de sauter à l'événement suivant; par conséquent, il faut constamment garder à jour une liste chronologique des prochains événements à venir et garder cette liste "ouverte" pour pouvoir y insérer ceux qui demeurent encore inconnus.

Le mécanisme de mise à jour de la liste des événements constitue ce qu'on appelle **l'horloge.** Sa fonction peut se résumer comme suit :

i) identifier le prochain événement à survenir dans la liste;

ii) déclencher une procédure de traitement de cet événement, c'est-à-dire une procédure qui
   - met à jour l'état du système en fonction de cet événement;
   - détermine le ou les événements générés par l'événement traité et qui insère ceux-ci aux endroits appropriés dans la liste des événements à survenir;
   - provoque le cas échéant la modification des informations associées aux événements qui sont affectés par l'événement traité[1];

iii) éliminer de la liste l'événement traité.

La figure 13 schématise le rôle central que joue le concept d'horloge dans la "version dispatching" de notre simulateur : assurer la gestion de la liste des événements à survenir et susciter en conséquence la mise à jour de l'état du système en fonction des événements rencontrés et insérés chronologiquement dans la liste. Cette mise à jour se fait donc notamment en fonction des décisions de l'usager-dispatcheur puisque celles-ci constituent des événements.

---

[1]. Exemple : l'événement qui consiste à insérer une nouvelle destination dans la tournée d'un véhicule affecte les heures d'arrivées des événements correspondant à la visite des destinations subséquentes à la nouvelle destination.

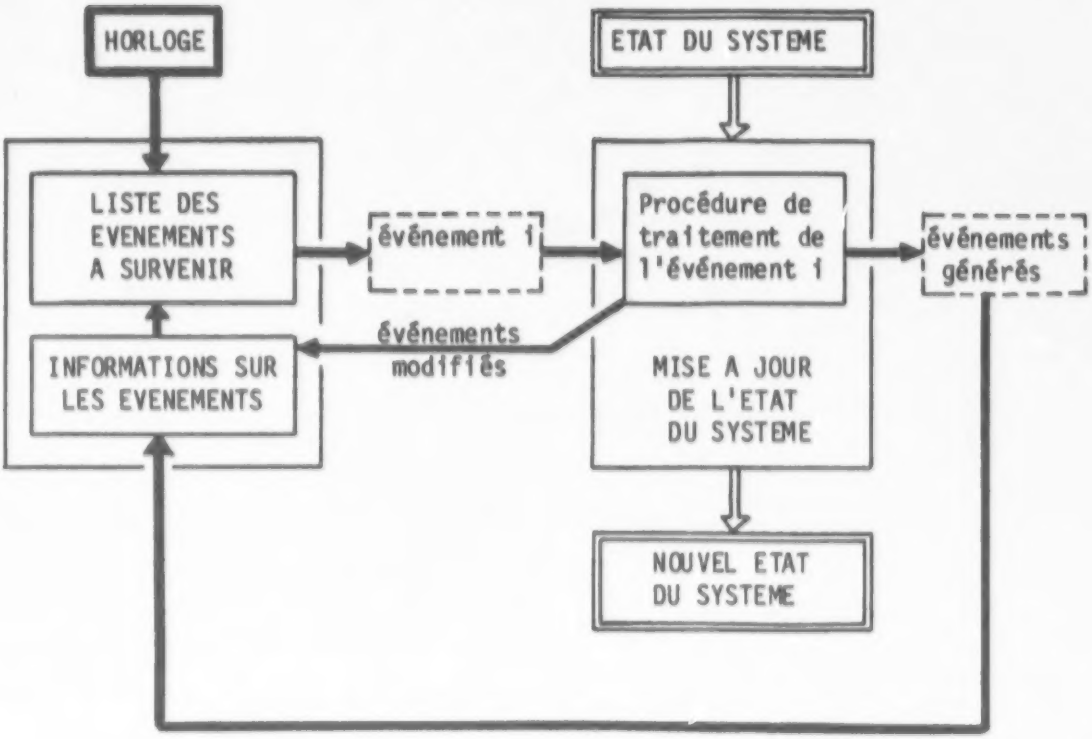


Figure 13. Le concept d'horloge.

7.2.3 Le mécanisme de dilatation du temps

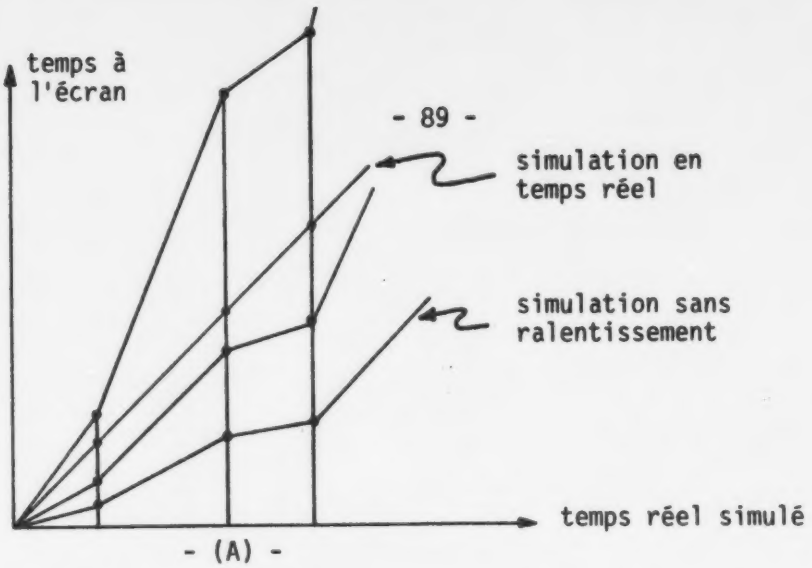
Étant donné que l'on saute d'événement en événement dans la liste en question plus haut, le temps passé par l'usager-dispatcheur à l'écran du micro-ordinateur sera évidemment plus court que le temps réel correspondant à la suite des événements traités. Le problème, c'est que dans un environnement temporel ainsi accéléré, la tâche de l'usager dispatcheur risquerait de devenir très pénible, voire impossible la plupart du temps. En fait, même si l'on travaillait en temps réel, sa tâche pourrait devenir très difficile dans certaines circonstances comme c'est effectivement le cas dans la réalité. Dans le cadre d'un simulateur conçu comme instrument d'apprentissage, il devient nécessaire de disposer d'un mécanisme permettant de ralentir le temps, et même de "figer l'instant" si nécessaire, de façon à permettre à l'usager-dispatcheur de faire l'analyse de la

situation et de prendre ses décisions sans subir le stress d'un véritable dispatcheur. Bien entendu, il convient aussi de ne pas tomber dans l'excès contraire en donnant trop de temps à l'usager-dispatcheur, ce qui éliminerait une large part des difficultés qui dans la réalité résultent de la pression exercée par le temps.

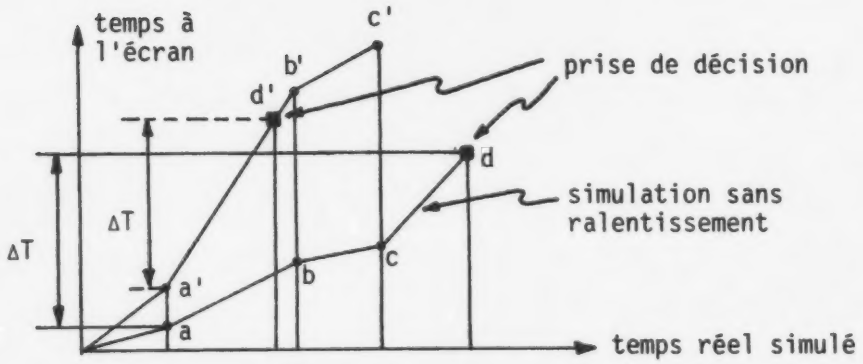
Ces diverses constatations nous ont amené à concevoir l'intégration au simulateur d'un **mécanisme de dilatation de temps** qui permet au maître de jeu d'imposer au déroulement de la simulation un ralentissement dont l'intensité peut être choisie en fonction du degré d'expérience de l'usager-dispatcheur. Ce mécanisme détermine la mesure dans laquelle le temps qui s'écoule effectivement à l'écran du micro-ordinateur se rapproche et éventuellement dépasse (s'avère plus lent que) le temps réel correspondant à la succession des événements simulés.

La figure 14(A) schématise l'effet de ce mécanisme sur l'arrivée à l'écran d'événements successifs (a, b, c, ...), cela pour différentes intensités de ralentissement. La courbe inférieure représente la simulation sans ralentissement. Cette courbe est "brisée" (i.e. non linéaire) parce que le temps informatique requis pour le traitement de chaque événement et l'affichage des résultats à l'écran va varier d'un événement à l'autre. Chacune des deux autres courbes "brisées" correspond à l'application d'un facteur de dilatation constant (i.e. le même facteur multiplicatif pour tous les temps mesurés sur l'axe vertical); évidemment, la courbe supérieure correspond au plus grand facteur de dilatation. La droite à 45 % représente une simulation totalement en temps réel; dans ce cas, le facteur de dilatation sur l'axe vertical varie d'un événement à l'autre : les instants d'arrivée des événements à l'écran sont déterminés directement à partir des instants d'arrivée de ces événements dans le temps réel simulé.

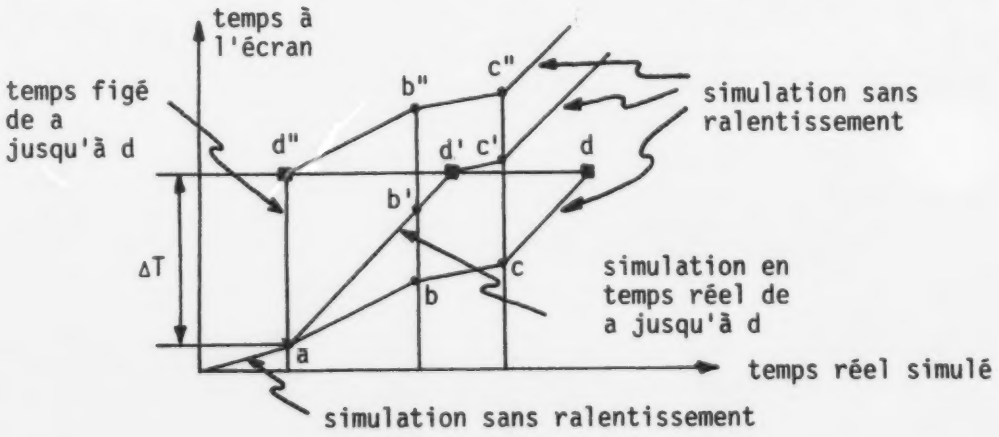
La figure 14(B) schématise l'effet du ralentissement du temps sur la prise de décision à l'intérieur d'une succession d'événements. Supposons que le point a représente le 1er événement qui requiert une prise de



- (A) -



- (B) -



- (C) -

Figure 14. Dilatation du temps.

décision, et supposons qu'il faut un temps ΔT à l'usager-dispatcheur pour anlayser la situation et prendre sa décision. Sans ralentissement du temps (courbe inférieure), deux événements, b et c, se produisent avant l'événement d = "prise de décision". Dans le cas de la simulation ralentie, l'usager-dispatcheur a réussi, dans le même laps de temps ΔT, à prendre sa décision avant l'arrivée des événements b et c à l'écran.

La figure 14(C) indique que le mécanisme de dilatation du temps peut n'être appliqué qu'au moment de l'arrivée d'un événement requérant une prise de décision (événement a), et cela jusqu'à cette prise de décision, la simulation se poursuivant ensuite sans ralentissement jusqu'à l'arrivée d'un autre événement requérant une prise de décision, et ainsi de suite. La courbe o a b'd'c' représente ici plus exactement une simulation sans ralentissement jusque l'événement a, puis en temps réel jusqu'à la prise de décision d', et ensuite sans ralentissement. La courbe supérieure oad"b"c" procède du même principe, mais au lieu d'appliquer un ralentissement à partir de l'événement a requérant une décision, on fige totalement le temps réel jusqu'à ce que la décision soit prise (événement d"), puis la simulation se poursuit sans ralentissement.

7.3 DONNÉES ET VARIABLES DE BASE, VARIABLES DE DÉCISION ET VARIABLES DE SIMULATION

Comme dans le chapitre 6, les **Données de Base** sont celles qui déterminent l'environnement général dans lequel chaque simulation va se dérouler. Elles sont fixées pour toute la durée d'une simulation. Certaines constituent des paramètres dont les valeurs peuvent être choisies par le maître de jeu. Les **Variables de Décision** sont celles que l'usager-dispatcheur contrôle totalement. Les **Variables de Simulation résultent de l'exécution du Programme de Simulation.**

Les **Variables de Base** constituent une nouveauté par rapport au chapitre 6. Comme les Données de Base, elles sont nécessaires pour décrire

l'environnement dans lequel l'usager-dispatcheur va prendre ces décisions, mais contrairement aux Données de Base, elles ne sont ni connues ni fixées a priori. Il s'agit en fait de toutes les variables générées de façon aléatoire pour caractériser la demande de transport et différents autres éléments non-déterministes du système; ces variables sont produites par le Programme de Simulation comme le sont les Variables de Simulation en question plus haut, mais contrairement à celles-ci, elles constituent des inputs nécessaires à la prise de décisions.

Les **Données de Base** regroupent principalement

1) Les données nécessaires à la représentation de la région considérée et de son réseau routier :
   - les zones et leurs centroïdes (noeuds du réseau);
   - les arcs reliant les noeuds;
   - la matrice des distances sur les plus courts chemins entre toutes les paires de noeuds (pour calculer les temps de déplacements des véhicules);
   - les listes des noeuds intermédiaires sur tous les plus courts chemins entre toutes les paires de noeuds (pour localiser les véhicules en mouvement);
   - des données permettant de rendre compte de la congestion du réseau routier (par exemple, sous la forme de facteurs de ralentissement propres à différents groupes d'arcs).

2) L'identification du noeud où est localisé le terminus.

3) Les données décrivant la flotte de véhicules:
   - le nombre de catégories de véhicules;
   - pour chaque catégorie, le nombre de véhicules, leur capacité et leur vitesse; éventuellement, un coût d'opération unitaire peut être spécifié si l'on veut traduire les opérations en termes financiers.

4) Les données générales sur la demande de transport, c'est-à-dire sur les requêtes pour les services de cueillette et livraison. Ces données de base sont nécessaires pour la génération des variables aléatoires décrivant exactement les requêtes[1] (voir plus loin). Les requêtes relatives aux cueillettes seront générées de façon individuelle dans le temps (i.e. un temps d'arrivée distinct pour chaque requête); les requêtes relatives aux livraisons seront générées par blocs (i.e. un temps d'arrivée identique pour plusieurs requêtes puisqu'il s'agit en fait de l'arrivée de camions au terminus).

Pour les requêtes non connues d'avance, il faut définir :

- les temps minimum et maximum entre lesquels les requêtes de chaque catégorie (cueillette et livraison) seront générées, i.e. transmises à l'usager dispatcheur; plusieurs plages de temps peuvent être définies pour chaque catégorie;
- les nombres minimum et maximum de requêtes - ou de blocs de requêtes (pour les livraisons) - dans chaque plage de temps spécifiée ci-dessus; une autre possibilité est de spécifier un taux horaire d'arrivée des requêtes - ou blocs de requêtes - si, par exemple, on suppose l'existence d'un processus de Poisson;
- les volumes minimum et maximum de marchandises pour une requête de type cueillette;
- les volumes minimum et maximum de marchandises pour une requête de type livraison, et les nombres minimum et maximum de telles requêtes dans un bloc;
- l'écart de temps minimal et maximal entre l'heure d'arrivée d'une requête et l'heure à laquelle "au plus tôt" un véhicule doit se rendre sur le lieu de cette requête; idem pour l'heure "au plus tard";

---

[1]. Chaque requête est associée à un centroïde (noeud du réseau).

- le poids relatif de chaque zone (centroïde) dans la répartition spatiale des requêtes de chaque catégorie sur la région considérée.

Les requêtes connues d'avance seront obtenues comme les autres requêtes, mais dans une phase de pré-simulation correspondant à une ou deux journées antérieures. Pour la séance de simulation proprement dite, l'heure d'arrivée de ces requêtes, dont on ne gardera qu'une partie, sera toujours l'instant t=0, et on décalera de 24 ou 48 heures la fenêtre de temps (heure "au plus tôt" et heure "au plus tard") à l'intérieur de laquelle chaque requête doit être visitée par un véhicule.

5) Les données relatives aux services sur les lieux des requêtes:

- les temps minimum et maximum qu'un véhicule passe sur le lieu d'une requête pour y effectuer la cueillette ou la livraison, en supposant qu'il y arrive entre les heures "au plus tôt" et "au plus tard" prévues.

6) Les données nécessaires pour préciser la disponibilité des véhicules. Il s'agit par exemple de données sur :

- les horaires des véhicules (débuts et fins des pauses);
- l'entretien des véhicules;
- le temps nécessaire pour décharger un véhicule au terminus après une tournée de cueillettes ou de cueillettes et livraisons (en tenant compte du volume de marchandises à bord du véhicule).

Les **Variables de Base**, qui décrivent tous les éléments non- déterministes du système, proviennent de lois de probabilités données. Les valeurs de ces variables aléatoires (i.e. les observations) sont obtenues à l'aide de nombres pseudo-aléatoires issus d'une loi uniforme [0,1]. En particulier, il faut générer :

1) Les variables aléatoires décrivant les requêtes:

- l'heure d'arrivée de chaque requête du type cueillette et de chaque bloc de requêtes du type livraison, à l'intérieur de chaque plage de temps spécifiée dans les données de base;

- le nombre de requêtes dans chaque bloc de requêtes du type livraison;
- le volume de marchandises correspondant à chaque requête;
- le lieu (centroïde) associé à chaque requête;
- la fenêtre de temps à l'intérieur de laquelle chaque requête doit être visitée (heure "au plus tôt" et heure "au plus tard").

2) Les variables aléatoires affectant le statut des véhicules:

- le temps de service qu'un véhicule passe sur le lieu d'une requête lorsqu'il y arrive à l'intérieur de la fenêtre de temps associée à cette requête. Si le véhicule arrive avant l'heure "au plus tôt", il attend avant de pouvoir effectuer le service. S'il arrive après l'heure "au plus tard", le temps de service est majoré (par exemple de 30 ou 60 minutes);
- d'autres variables telles que, par exemple, celles décrivant les probabilités de panne ou d'accidents des véhicules en mouvement. Quant un véhicule subit une panne ou un accident lors d'une tournée, par exemple dans le voisinage du noeud x, et qu'il reste des livraisons à effectuer dans le cadre de cette tournée, l'usager-dispatcheur doit obligatoirement affecter un autre véhicule à ces livraisons en l'envoyant d'abord au noeud x (pour récupérer les marchandises à livrer). Les cueillettes qui restent à faire sont simplement remises en file d'attente. Quant aux cueillettes déjà effectuées dans le cadre de la tournée interrompue, elles sont remplacées par une nouvelle cueillette à effectuer au noeud x. Évidemment, il n'y a aucune mesure à prendre pour les livraisons déjà effectuées.

Les **Variables de Décision** permettent à l'usager-dispatcheur[1] de prendre les décisions suivantes :

---

[1]. Comme pour la "version planification stratégique/tactique" du simulateur, le Programme Interactif d'Entrée-Sortie assurera des tests de validité et de cohérence sur les variables de décision.

1) Affecter un véhicule donné (se trouvant au terminus) à une tournée de requêtes et spécifier l'heure du début de cette tournée. Dépendant des "règles du jeu", une tournée peut inclure ou non des requêtes des deux catégories considérées (i.e. des cueillettes et des livraisons, ou seulement des cueillettes ou des livraisons).

2) Détourner un véhicule en tournée sur une ou plusieurs autres requêtes, c'est-à-dire insérer une ou des requêtes additionnelles dans une tournée en cours, en spécifiant le lieu (noeud) où commence le détournement.

3) Annuler la totalité ou une partie d'une tournée en cours en spécifiant le premier et le dernier des noeuds éliminés.

Les **Variables de Simulation** appartiennent à deux catégories. La première regroupe des variables nécessaires à la modélisation du système, et en particulier celles nécessaires à la description des "événements conditionels" qui ne constituent pas des décisions de l'usager-dispatcheur (ex. : les heures d'arrivée effectives sur les différents lieux des requêtes d'une tournée, ou les heures de départ correspondantes, ou les taux de remplissage progressifs des véhicules pour les tournées impliquant des cueillettes, etc.). L'autre catégorie regroupe différentes statistiques d'opération que l'usager-dispatcheur peut consulter à la fin d'une séance de simulation[1] (ex. : des statistiques sur les véhicules-heures ou véhicules-km, sur les écarts entre les heures de visite des lieux de requêtes et les fenêtres de temps souhaitées par les clients, sur les durées des tournées, etc.).

7.4 LES MODULES DE SIMULATION ET LE MODULE D'AIDE À LA DÉCISION ET À L'ÉVALUATION

En raison du caractère dynamique des simulations, une représentation complète et détaillée des interrelations entre les différentes composantes du Programme de Simulation de la "version dispatching" de SIMTRUCK pourrait

---

[1]. Ou bien avant la fin si le maître de jeu autorise l'interruption de la simulation en "figeant l'instant".

rapidement devenir illisible. La figure 15 réalise un compromis. Elle identifie les quatre modules principaux de ce Programme, ainsi que le Module de Répartition Assistée par Ordintateur (module RAO) qui, tel qu'indiqué au chapitre 6, constitue le Module d'Aide à la Décision et à l'Évaluation.

7.4.1 Les quatre modules de simulation

Le **Module de Génération des Variables Aléatoires** est, comme son nom l'indique, utilisé pour déterminer tous les éléments non-déterministes du système dont nous avons parlé dans la section 7.3. C'est ce module qui crée le fichier des requêtes (temps d'arrivée, localisations, fenêtres de temps pour les cueillettes/livraisons et volumes), qui génère les temps de service passés sur les lieux de requêtes et qui suscite à l'occasion des pannes ou accidents.

Le **Module de Simulation des Tournées** calcule les temps de déplacement des véhicules sur le réseau routier et détermine leurs localisations et capacités résiduelles successives, cela en fonction des décisions de l'usager-dispatcheur sur les tournées de cueillette/livraison, ainsi qu'en fonction des requêtes visitées et des variables aléatoires affectant le statut des véhicules. En particulier, lorsqu'un véhicule arrive sur le lieu d'une requête, ce module active la procédure de génération de la variable aléatoire représentant le temps de service en ce lieu.

Les **Modules des Requêtes et des Véhicules** sont simplement des modules de mise à jour des statuts des véhicules et des requêtes au fur et à mesure que les tournées se déroulent, cela à partir des informations fournies par le Module de Simulation des Tournées, lequel tient compte des différents aspects aléatoires desdites tournées, ainsi que de leur modification éventuelle par l'usager-dispatcheur avant qu'elles soient complétées.

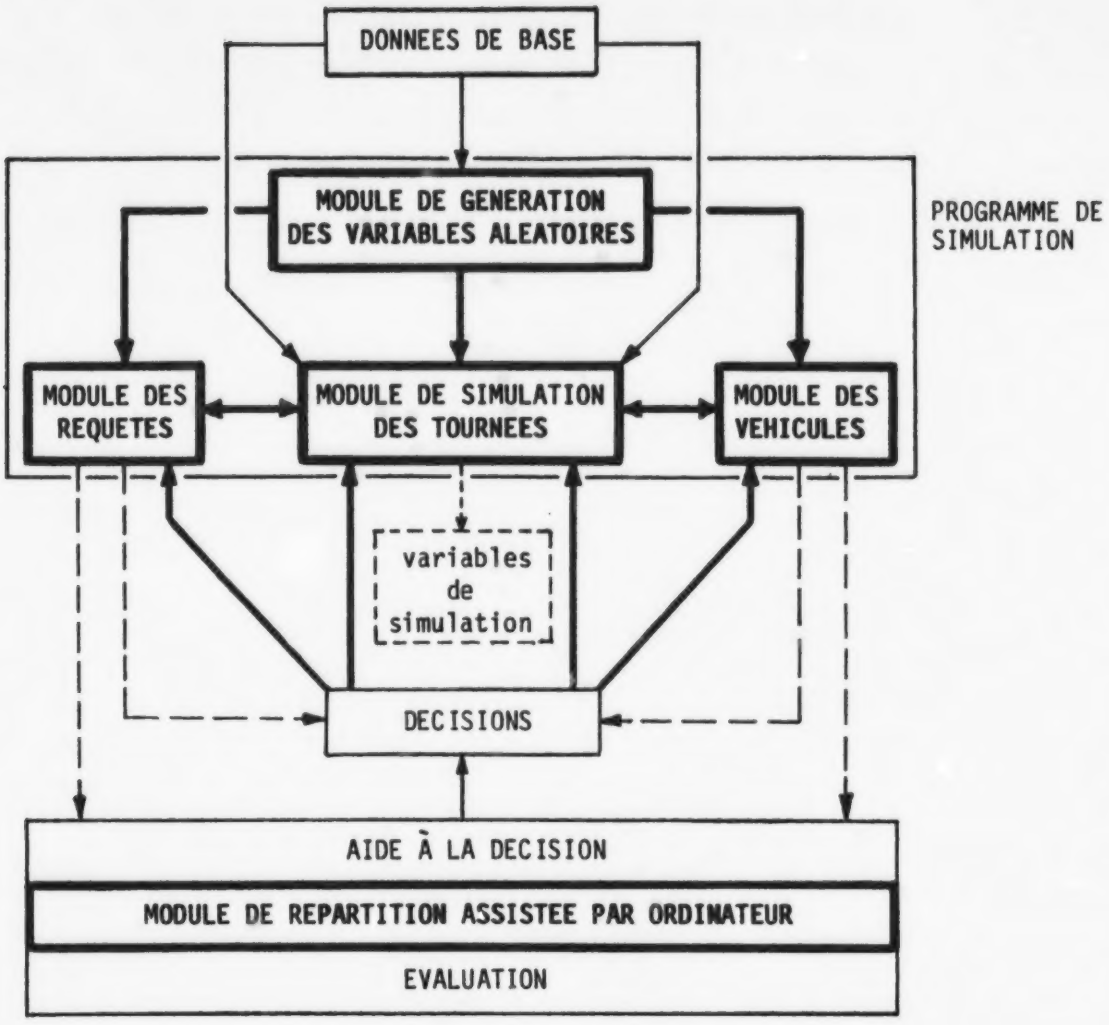


Figure 15. Modules de simulation et d'aide à la décision et à l'évaluation pour la version dispatching de SIMTRUCK.

7.4.2 Le module de répartition assistée par ordinateur

Au cours d'une séance de simulation, l'usager-dispatcheur (si le maître de jeu le permet, i.e. quand le Niveau de complexité = N1) pourra avoir recours à un module RAO de "Répartition Assistée par Ordinateur" dont le rôle sera de lui suggérer des véhicules pour la cueillette et la livraison des marchandises.

Plusieurs méthodes existent et peuvent être utilisées pour générer ces "suggestions" qui, en termes de recherche opérationnelle, correspondent à des solutions optimales dépendant de l'algorithme utilisé et du critère choisi pour mesurer l'optimalité. En fait, dans notre cas, nous devons faire la distinction entre deux groupes principaux d'algorithmes.

Le premier est celui des algorithmes conçus pour déterminer la route "optimale" d'un véhicule qui à partir d'un garage, doit se rendre sur différents lieux donnés de cueillette et/ou livraison. Ces algorithmes, qui peuvent tenir compte des contraintes particulières à notre contexte (fenêtres de temps, capacité des véhicules, ...), sont particulièrement appropriés pour traiter les requêtes que nous disons "connues d'avance", c'est-à-dire celles pour lesquelles on peut planifier à l'avance les routes et horaires des véhicules qui se rendront sur les lieux concernés. Ils sont également appropriés pour traiter de la même façon des groupes de requêtes arrivées en cours de simulation et placées en file d'attente (i.e. non traitées immédiatement au moment de leur arrivée). Le problème, dans le contexte de notre simulateur pour fins d'apprentissage, c'est que ces algorithmes sont précisément "trop appropriés" : si l'usager-dispatcheur pouvait avoir recours à ce type d'algorithmes, il n'aurait tout simplement plus grand chose à faire. Aussi, nous limiterons le recours à de tels algorithmes pour l'**évaluation a postiori** des décisions de l'usager-dispatcheur (voir plus loin), sauf si le maître de jeu considère que l'utilisation de ces algorithmes s'avère en soi opportune pour permettre à l'usager de se familiariser avec ce genre d'outils d'aide à la décision.

Le second groupe d'algorithmes pertinents à notre contexte est celui des algorithmes conçus pour "optimiser" l'insertion de nouvelles requêtes dans des tournées de véhicules déjà établies. C'est ce genre d'algorithmes auxquels l'usager-dispatcheur pourra avoir recours pour solliciter des suggestions afin de décider, parmi les tournées qu'il a déjà établies,

laquelle devrait inclure telle ou telle requête non encore traitée. En fait, deux cas sont à considérer : celui de l'insertion dans les tournées déjà établies mais qui n'ont pas encore commencé, et celui de l'insertion dans les tournées en cours. Le maître de jeu pourra décider si les suggestions porteront sur les deux types de tournées, ou seulement sur un seul.

Précisons que ces suggestions feront intervenir différents critères, le choix final restant sous la responsabilité de l'usager-dispatcheur. Les suggestions, pour chaque "nouvelle" requête, pourront entre autres correspondre aux critères suivants :

- le véhicule dont la tournée passera le plus près du lieu de la nouvelle requête;
- le véhicule qui peut atteindre la nouvelle requête le plus rapidement;
- le véhicule qui, parmi ceux pouvant rejoindre la nouvelle requête à l'intérieur de la fenêtre de temps correspondante, subira le détour minimum;
- le véhicule qui, parmi ceux pouvant rejoindre la nouvelle requête à l'intérieur de la fenêtre de temps correspondante, peut y arriver le plus rapidement;
- etc.

Le module RAO, pour chaque critère, va suggérer le meilleur véhicule, puis le deuxième meilleur, puis le troisième, etc..., et pour chaque suggestion l'usager pourra faire appel à des procédures évaluant et visualisant les conséquences de l'insertion dans la tournée du véhicule concerné. Nous envisageons également le recours à des algorithmes qui traiteront l'insertion de plusieurs nouvelles requêtes à la fois, et non pas seulement d'une seule.

Pour conclure, rappelons que c'est le même module RAO qui sera utilisé pour évaluer a posteriori les stratégies d'opération de l'usager-dispatcheur. Les deux types d'algorithmes dont nous avons parlé ci-dessus peuvent en effet être utilisés pour déterminier respectivement des tournées et des insertions de véhicules "optimales" dont les performances peuvent

servir de comparaison pour l'évaluation des performances de l'usager-dispatcheur relativement à différents critères. À cette fin, on gardera en mémoire la liste des événements "extérieurs" (voir section 7.2.1) subis pour l'usager-dispatcheur de façon à ce que les tournées ou insertions optimales en question soient déterminées dans le même contexte que celui dans lequel l'usager a effectivement travaillé.

8. CONCLUSION

Ce rapport a présenté l'essentiel des travaux réalisés jusqu'à présent pour la conception et le développement d'un simulateur d'entreprises de transport routier de marchandises destiné à être utilisé :

- comme instrument d'aide à la formation de planificateurs, gestionnaires et autres professionnels dans ce secteur de l'industrie du transport;
- comme outil d'expérimentation pour la recherche, l'analyse et la formation de chercheurs en ce domaine;
- comme support au transfert technologique de nouveaux concepts et de nouvelles méthodes vers l'industrie.

Ce simulateur, appelé SIMTRUCK, est conçu sous la forme d'un jeu d'analyse et de prise de décisions, c'est-à-dire sous la forme d'un laboratoire reproduisant artificiellement des situations comparables à celles que peuvent rencontrer en pratique de véritables responsables de compagnies de camionnage.

En particulier, SIMTRUCK a été conçu pour simuler deux grands types de situations. Le premier a trait à la planification tactique des réseaux de services et du routing des marchandises dans les entreprises concernées, ainsi qu'à la planification stratégique de leurs activités en situation de concurrence. Le second type de situations, à un niveau plus opérationnel, a trait au dispatching des activités de cueillette et livraison des marchandises en milieu urbain et suburbain à partir d'un terminus donné. D'autres situations et d'autres familles de problèmes pourront plus tard être considérées et intégrées au simulateur.

Ce rapport conclut la première étape d'un projet qui s'avère donc relativement ambitieux puisqu'il porte sur des situations complexes tout en visant leur traitement sous la forme d'un logiciel de simulation qui doit

être facile et agréable à utiliser compte tenu des objectifs visés. À l'issue de ce rapport, nous sommes toutefois convaincus que les travaux réalisés jusqu'ici ont sufisamment progressé pour que ceux à venir atteignent ces objectifs.

RÉFÉRENCES

[1] Crainic T.G. and Roy J. (1988). OR tools for tactical freight transportation planning. European Journal of Op. Res. 33(3).

[2] Duke R.D. (1980). Format for the game-logic or intuition? Simulation and Games 11(1).

[3] Elias A.L. (1979). The development of an operational game for the U.S. domestic airline industry. FTL Report R78-5, MIT.

[4] Greenblat C. (1987). Designing Games and Simulations. Sage Publ.

[5] Lardinois C. (1988). Simulation, gaming and training in a competitive multimodal multicompany intercity passenger transportation environment. Publ. 588, CRT, Univ. de Montréal. Accepté pour publication dans le Journal of the Op. Res. Society.

[6] Ortuzar J.D. and Willumsen L.G. (1978). Learning to manage transport systems. Traffic Engineering and Control 19(5).

[7] Rousseau J.-M. and Roy S. (1988). RAO : répartition assistée par ordinateur. La description d'un prototype. Publ. 564, CRT, Univ. de Montréal.

[8] Roy J. (1984). Un modèle de planification globale pour le transport routier de marchandises. Thèse de doctorat, École des Hautes Études commerciales, Montréal.

[9] Simulation and Games, special issue: A practical guide to business gaming (1987) 18(2).

[10] Trudeau P. et al. (1987). Un modèle de simulation pour un système d'urgence-santé : la méthodologie. Publ. 530, CRT, Univ. de Montréal.

[11] Willumsen L.G. and Ortuzar J.D. (1985). Intuition and models in transport management. Transportation Research 19A(1), 51-57.